

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ODSTRAŇOVÁNÍ PŮVODNÍCH POVLAKŮ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ PŘED NOVÝM POVLAKOVÁNÍM

STRIPPING OF ORIGINAL COATS OF CUTTING TOOLS BEFORE NOW COATING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAKUB NĚNIČKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ANTON HUMÁR

BRNO 2008

ABSTRAKT

Charakteristiky povlakovacích metod PVD, CVD, PACVD, MTCVD. Rozdělení PVD metod. Přípravné operace před povlakováním stopkových nástrojů a odvalovacích fréz. Chemické odpovlakování HSS. Elektrochemické odstranění povlaku AlCrN. Různé pokusné metody odpovlakování slinutých karbidů. Nalezení nejšetrnější odpovlakovací metody s pomocí elektronového mikroskopu. Historie povlakování. Typy povlaků, jejich použití, vlastnosti a testování. Povlakovací zařízení, jeho popis a základní údaje. Příprava nástrojů na povlakování. Průběh povlakování. Význam geometrie, řezného materiálu a povlaku ve vztahu k životnosti nástroje. Vyhodnocení testu odvalovacích fréz.

Klíčová slova

Druhy povlakování, příprava nástrojů před depozicí, chemické odpovlakování, elektrochemické odpovlakování, historie povlakování, typy povlaků, průběh povlakování.

ABSTRACT

Characteristics of coating methods PVD, CVD, PACVD, MTCVD. The parting of the PVD methods. Advance operations before coating of round tools and hobs. Chemical stripping of HSS. Electrochemical stripping of AlCrN coating. Differently experimental methods of stripping of the cemented carbides. Finding of the most favour stripping method with help of the electron microscope. The history of the coating. Types of coatings, their usage, properties and testing. Coating machine, description and characteristics data. Preparation of tools on the coating. Behaviour of the coating process. Signification of the geometry, cutting material and coating in relation to tool life. Test evaluation of the hobs.

Key words

Types of coating, preparation of the tools before new coating, chemical stripping, electro chemical stripping, history of the coating, types of coatings, behaviour of the coating.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NĚNIČKA, Jakub. *Odstraňování původních povlaků řezných nástrojů před novým povlakováním*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. s. 78, příloh 6. Doc. Ing. Anton Humár, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Odstraňování původních povlaků řezných nástrojů před novým povlakováním vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....

Bc. Jakub Něnička

Poděkování

Děkuji tímto Lubomíru Zímovi za cenné rady a připomínky k diplomové práci, možnost naučit se zacházet se zařízením společnosti CemeCon a seznámit se s problematikou povlakování po praktické stránce. Rovněž děkuji za podělení se o své praktické zkušenosti s problematikou povlakování, které mně významně pomohly při sepsání této práce.

Děkuji tímto doc. Ing. Antonu Humárovi CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Děkuji tímto oddělení výroby společnosti CemeCon, jmenovitě vedoucímu výroby Mgr. Petru Adamovi a operátorům Pavlu Pelikánovi a Jaroslavu Trautmannovi za trpělivost při zaučení a objasnění nejasností v zacházení a údržbě zařízení firmy CemeCon.

Děkuji tímto paní Ing. Drahomíře Janové, za poskytnutý čas a možnost vyhodnocení vzorků na elektronovém mikroskopu.

Děkuji tímto Ing. Aleši Matouškovi za poskytnutý čas při přípravě vzorků určených pro zkoumání na elektronovém mikroskopu.

OBSAH

Abstrakt	2
Prohlášení	3
Poděkování	4
Obsah	5
Úvod	7
1. Charakteristika povlakovacích metod (PVD, CVD, PACVD, MTCVD) ...	9
1.1. CVD (Chemical vapor deposition)	9
1.2. MTCVD	10
1.3. PACVD	11
1.4. PVD povlakování	11
1.4.1. Napařování s přídavnou ionizací	12
1.4.2. Obloukové napařování	13
1.4.3. Klasické napařování	14
1.4.4. Magnetronové napařování	15
2. Rozbor problematiky přípravy nástroje před povlakováním metodou PVD	17
2.1. Druhy předdepozičních příprav	17
2.1.1. Úprava ostří	17
2.1.2. Odmaštění	19
2.1.3. Mokrý čištění	21
2.1.4. Odjehlení	21
2.1.5. Iontové čištění	21
2.1.6. Stripping	22
2.2. Příprava stopkových nástrojů ve spol. CemeCon	22
2.3. Příprava odvalovacích fréz ve spol. CemeCon	23
2.3.1. Odpovlakování elektrochemickou cestou	23
2.3.2. Odpovlakování chemickou cestou	25
2.4. Praktické posouzení důležitosti přípravy nástroje	27
3. Realizace odstranění původního povlaku z vybraných řezných nástrojů	29
3.1. Tryskání	30
3.2. Tryskání suchým ledem	30
3.3. Laser	31
3.4. Chemické odpovlakování	31
3.4.1. Příklady chemického odpovlakování HSS	32
3.4.2. Základní legenda vlivů na rychlost a efektivitu odpovlakování	34
3.4.3. Výrobci chemických prostředků pro odpovlakování	35
3.5. Elektrochemické odpovlakování	35
3.5.1. Příklad elektrochemického odpovlakování	36
3.5.2. Elektrochemická pasivace	38
3.6. Vlastní experiment	39
3.6.1. Příprava vzorků	39
3.6.2. Nenapovlakované vzorky	40

3.6.3. Odstranění povlaku metodou chemického odpovlakování slnutých karbidů	42
3.6.4. Odstranění povlaku metodou chemického odpovlakování HSS	44
3.6.5. Odstranění povlaku metodou elektrochemického odpovla- kování	45
3.6.6. Porovnání principu odstranění povlaku	46
4. Nanesení nových povlaků a vyhodnocení vlastností vybraných řez- ných nástrojů	47
4.1. Historie PVD povlakování	47
4.2. Druhy povlaků, jejich použití, vlastnosti a testování	48
4.2.1. Povlaky v třískovém obrábění	48
4.2.2. Povlaky ve tváření	50
4.2.3. Povlakování forem na zpracování plastů	50
4.2.4. Jiná využití povlaků	51
4.2.5. Druhy povlaků nanášených pomocí PVD	52
4.2.6. Testování kvality povlaků	54
4.3. Povlakovací zařízení společnosti CemeCon s.r.o.	58
4.4. Terče	59
4.5. Příprava stopkových nástrojů na povlakování	61
4.6. Příprava odvalovacích fréz na povlakování	62
4.7. Příprava povlakovacího zařízení	63
4.8. Spuštění procesu povlakování.....	64
4.9. Vlastní experiment	65
5. Technicko – ekonomické hodnocení	67
5.1. Test odvalovacích fréz	68
Závěr	70
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	72
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	75
SEZNAM PŘÍLOH	76

ÚVOD

Strojírenská technologie – obrábění, je obor, který se dynamicky vyvíjí, a to jak v oblasti obráběcích strojů, tak i v oblasti obráběcích nástrojů. Prvopočátky technologie obrábění sahají až do pravěku, kdy si člověk vytvářel primitivní kamenné nástroje odštěpováním ostrých kousků z pazourku o jiný kámen (1,5 mil. let př.n.l.). Podstatná část vývoje obrábění se odehrávala ve stejném čase jako průmyslová revoluce, probíhající v 18. a 19. století, aby pak ve 20. století došlo k podstatnému zrychlení. Ať si to moderní člověk připustí, nebo ne, bez moderní technologie obrábění by svět zdaleka nevypadal tak, jako dnes. Moderní technologie obrábění dovoluje vytvářet tvarově a rozměrově složité součásti, často při mnohem nižších cenách, než kdyby byla při zachování parametrů přesnosti a rychlosti výroby použita jiná technologie, než obrábění. Dokonce i jiné technologie, jako např. technologie lisování a stříhání jsou závislé na technologii obrábění, protože např. střížný nástroj je natolik rozměrově a tvarově složité zařízení, které ani jinak vyrobit nelze.

Pokrok v tomto oboru lze vidět zejména ve zkrácení hlavních a vedlejších časů na obrobení obrobku. Obráběcí operaci, která trvala v 19. stol. 100 minut, je dnes možné udělat za použití nejmodernějších strojů, řezných materiálů a povlaků i za méně než 1 minutu.

Velký podíl na celkovém času obrábění zauímají vedlejší časy, mezi které lze mimo časů pro technologickou přípravu výroby, seřizování a údržbu obráběcích strojů, manipulaci s obrobkem, kontrolu, atd. zařadit též časy potřebné na přípravu, seřizování a výměnu nástrojů. Obecně čím vyšší trvanlivost má nástroj, tím méně často je třeba ho vyměňovat a tím více se ušetří na vedlejších časech. Zatímco na počátku 20. stol. bylo možno jedním břitem obrobit 2,5 obrobku, na konci 20. stol. bylo již možno na jeden břit obrobit 60ks. toho samého obrobku. Zkrácení vedlejších časů bylo dosaženo i použitím vyměnitelných břitových destiček. Již se nemusel nástroj vytahovat ze stroje, nahrazovat jiným, který se musel opět přesně ustavit, nyní stačí jen vyměnit, či pootočit břitovou destičku a může se pokračovat v obrábění.

Důležitou etapou ve vývoji technologie obrábění je konstrukční a geometrické řešení řezného nástroje – jeho tvar, řešení jednotlivých částí (špička, ostří, utvařec třísky, upínací otvor atd.). To má vliv na správný odvod a lámání třísky, která by mohla zničit nástroj, nebo znehodnotit obrobenou plochu. Důležitým faktorem je správné vytvarování dosedacích ploch, které se provádí broušením, či lapováním. Důležitost těchto úprav spočívá v pevném dosednutí břitové destičky do tělesa nože a v dobrém přenosu tepla z destičky do jejího držáku, čímž je snížena teplota samotné destičky.

Způsobů, jakými byl urychlen proces obrábění je mnoho. Významnou roli v tomhle procesu zauímají řezné materiály, jejichž vlastnosti se projeví hlavně na zmenšení hlavních obráběcích časů. Redukce je dosaženo zejména použitím vyšších řezných rychlostí a posuvů. Obecně platí, že čím tvrdší je řezný materiál, tím vyšší řeznou rychlostí by se mělo obrábět. Avšak použitím vysokých řezných rychlostí dochází k většímu zahřívání ostří nástroje a tím i k možnému plastickému opotřebení, které má za následek vyšší zatížení nástroje a hlavně horší kvalitu a přesnost výsledné obrobené větší opotře-

bení nástroje a hlavně horší kvalitu a přesnost obrobené plochy. Naproti tomu vyšší posuv vyžaduje houževnatější řezný materiál. Avšak použití lepšího řezného materiálu nutně nezajistí kvalitnější výsledné výrobky. Použití vyšších řezných rychlostí a posuvů je podmíněno i použitím kvalitnějších a tužších obráběcích strojů.

Zásadní roli ve zdokonalení řezných nástrojů přineslo povlakování. Téměř „přes noc“ se trvanlivost a použitelná řezná rychlost navýšily o 30–50 %. Je možno povlakovat jakýkoliv řezný materiál. Technologie povlakování dává dohromady 2 protichůdné požadavky na materiál nástroje, tvrdost a houževnatost. Nanesené povlaky jsou vždy tvrdší než řezný materiál z něhož je nástroj vyroben. Tímto je v podstatě vytvořen nástroj s houževnatým jádrem a tvrdým povrchem. Pvlaky mají také nižší koeficient tření, což se projevuje na menším tepelném zatížení nástroje. Povlakované nástroje jsou lépe chráněny vůči různým druhům opotřebení např. abrazivnímu, oxidačnímu, vytváření nárůstku atd. Moderní povlakovací metody jsou již tak vyspělé, že je možné opatřit nástroj povlakem v podstatě jakýmkoliv povlakem, dokonce i povlakem z nejtvrďšího materiálu – diamantu.

Technologie obrábění je velmi složitá věda. Tato práce je zaměřena na problematiku odstraňování povlaků z řezných nástrojů před jejich novým povlakováním. Je zde popsána cesta stopkových nástrojů a odvalovacích fréz od příjmu nástrojů, přes přípravné operace, povlakování až po výstupní kontrolu. Obsahem práce je rovněž vlastní experiment, ve kterém byly zkoumány plochy slinutého karbidu a cermetu, na kterých byl odstraněn povlak různými vhodnými i nevhodnými odpovlakovacími způsoby. Pozornost byla zaměřena zejména na metodu chemického odpovlakování slinutých karbidů, která je patentovaná společností CemeCon. Odstranění povlaku ze slinutých karbidů bez poškození základního substrátu představuje v současnosti velkou výzvu.

1. Charakteristika povlakovacích metod (PVD, CVD, PACVD, MTCVD)

Povlakování se stalo nepostradatelnou částí většiny nástrojů určených pro obrábění. Přibližně 70 – 75 % nástrojů je opatřeno povlakem. Povlaky zvyšují odolnost vůči opotřebení, snižují koeficient tření mezi nástrojem a obrobkem a také mohou sloužit jako tepelná bariéra, což se projeví na vyšší životnosti nástroje, možné absenci provozních kapalin díky menšímu vývinu tepla na styčných plochách a menšímu podílu tepla převedeného do nástroje. Povlakování rozšiřuje rozsah použití daného nástroje a umožňuje užití vyšších řezných i posuvových rychlostí. Zdokonalením funkčních procesů jsou napovlakované nástroje pro obrábění schopny reagovat na změny obráběného materiálu a požadovaného procesu. Dnešní obráběcí operace mohou vyžadovat vysokorychlostní obrábění, obrábění za sucha, větší použití „near-net-shape“ obrobků, lepší kvalitu povrchu a užší rozměrové tolerance které nutí použít nástroje až na samé hranice jejich možností a spolehlivosti.

Povlakovací materiály přináší zdokonalení ve vyšší tvrdosti, chemické inertnosti a nižším koeficientu tření. U nepovlakovaných nástrojů ze slinutých karbidů je vyšší odolnosti opotřebení dosaženo vyšším obsahem tvrdých karbidů v kovovém pojivu na úkor nižší houževnatosti.

Procesy pro nanášení povlaků na základní řezné materiály jako jsou rychlořezná ocel, slinuté karbidy, cermety, keramika nebo supertvrdé řezné materiály jsou CVD (Chemical vapour deposition), nebo PVD (Physical vapour deposition). Zvolený proces závisí na chemických a strukturních složkách, geometrii nástroje a na jeho použití.

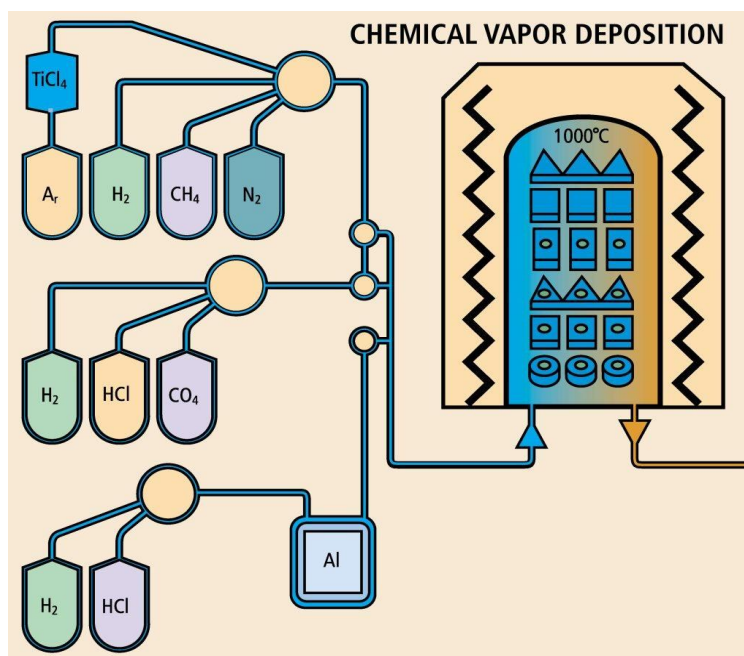
1.1. CVD (Chemical vapor deposition)

CVD bylo použito k výrobě prvních povlakovaných nástrojů na konci 60. a začátku 70. let. Při CVD procesu (obr. 1) jsou nástroje umístěny v hermeticky uzavřeném reaktoru ve směsi plynů. Při teplotě okolo 1000 °C tyto směsi plynů dodávající kovové a nekovové příměsi reagují na povrchu nástroje a vytvářejí povlakovací materiály jako karbid titanu (TiC), nitrid titanu (TiN), karbonitrid titanu (TiCN), a oxid hlinitý (Al_2O_3) a jiné. Tloušťka CVD vrstvy se pohybuje v rozmezí 5 – 20 μm .

Protože povlakovací materiály mají vyšší koeficient teplotní roztažnosti, než základní materiál, vzniká po ochlazení na pokojovou teplotu v nástroji zbytkové napětí. Napětí se uvolňuje příčnými lomy napovlakované vrstvy, které sice neovlivní přilnavost k materiálu, ale může vyvolat lom nástroje během přerušovaného obrábění. Zlomení nástroje se rovněž může stát při hrubování. Způsob obrany proti tomuto jevu je povrchová úprava povrchu povlakovaného nástroje po procesu povlakování. Zlepší se tím odolnost vůči lomu a zvýší se kluznost, která se projeví na výsledném obrobeném povrchu.

Vysoká teplota může rovněž vést k vytvoření křehké „eta fáze“ na rozhraní povlak/substrát. (Eta fáze je křehká zóna s deficitem uhlíku, obvykle jeden až dva mikrometry silná, která se formuje v karbidovém substrátu pod povlakem). Tato eta fáze může snížit příčnou lomovou pevnost slinutého karbidu

až o 30 %.² Obecně, nižší lomová pevnost znamená slabší řeznou hranu. Tento nedostatek CVD technologie je překonatelný nižší depoziční teplotou a lepší kontrolu uhlíku zaměřenou na minimalizaci formování eta-fáze. Nicméně, k redukci možného lomu na oslabené hraně s eta-fází je možno ještě přispět i leštěním řezných hran nástrojů před samotným procesem CVD.



Obr. 1 Technologie CVD ⁸

Vyšší teplota při užití metody CVD zajistí lepší spojení mezi základním materiálem a povlakovanou vrstvou. Avšak na druhou stranu má nepříznivý vliv na mikrostrukturní změny v základním materiálu, zmenšení trvanlivosti nástroje a jiné možné chyby vedoucí ke zničení nástroje. Proto mohou být povlačovány jen nástroje z materiálů, které vydrží takové tepelné zatížení.^{1, 10}

Metoda CVD se rovněž užívá k vytvoření povlaku z polykrystalického diamantu pro obrábění neželezných materiálů. Prim na poli diamantových povlaků hraje společnost CemeCon AG se svým největším CVD povlakovacím centrem na světě nacházejícím se v německém Würselenu.²¹

1.2. MTCVD

Jako odpověď na nedostatky metody CVD (příliš vysoká teplota při povlakování) byla vynalezena v r. 1980 metoda MTCVD (medium-temperature CVD). Metoda dovoluje nanášení, při teplotách v rozmezí 700 – 850 °C. Zatímco u metody CVD je používán plynný metan CH_4 jako zdroj uhlíku a čistý dusík, MTCVD metoda využívá jako vstupní sloučeninu acetonitril (CH_3CN) nebo též vysoce toxický a hořlavý metylcyanid. Zdrojem titanu je u obou metod chlorid titaničitý (TiCl_4). Rychlost růstu vrstvy TiCN je u metody MTCVD přibližně třikrát vyšší než u klasické vysokoteplotní CVD metody. Podkladový slinutý karbid se díky vysoké reaktivitě systému TiCl_4 - CH_3CN nepodílí na ovlivňování povlaku, tímto je difúze uhlíku z podkladu do povlaku zanedba-

telná, a proto je prakticky vyloučen vznik křehké eta - fáze mezi povlakem a podkladem.¹¹ Snížení teploty a rychlejší nanášení při MTCVD se projeví na vyšší houževnatosti základového materiálu a snížení lomů ve struktuře povlaku. Vyrobený povlak užitím MTCVD procesu je houževnatější než povlak z CVD. Tato zvyšující se houževnatost má za výsledek minimální delaminační opotřebení a zlepšení povrchu při obrábění materiálů, které mají tendenci tvořit nárůstek na břitů nástroje. Řezné nástroje povlakovány metodou MTCVD byly původně navrženy pro přerušované obrábění. Ale v poslední době se spíše užívají pro soustružení a jiné nepřerušované operace.

1.3. PACVD

Dalším druhem CVD povlakování je PACVD/PECVD (Plasma enhanced chemical vapor deposition). Jedná se o plasmaticky aktivovanou CVD metodu, „která se od klasické CVD metody liší nízkými pracovními teplotami (běžně 600 °C, podle některých údajů i méně, např. 480 - 560 °C), přičemž nemění její princip, tj. vytváření povlaku z plynné fáze. Metoda PCVD je založena na zvýšení energie plynné atmosféry v povlakovací komoře pomocí její ionizace a aktivace v plasmatickém výboji. Tímto způsobem chemicky aktivovaná plazma umožňuje snížit teplotu potřebnou pro ukládání povlaku na povrchu substrátu. Plazmu lze vytvořit pomocí vnějšího elektrického napájecího zdroje (nízkofrekvenční střídavé napětí, vysokofrekvenční střídavé napětí, stejnosměrné napětí, pulzní stejnosměrné napětí) nebo reaktivním plynem (např. NH_3). U elektrického napájení je za nejvýhodnější považována pulzní metoda, u které je vysoké stejnosměrné napětí přiváděno na katodu ve formě pečlivě řízeného sledu pulzů. Pulzy zapálí plazmu bez nebezpečí vzniku elektrických oblouků a v důsledku možnosti řízení jejich délky a přestávek mezi nimi lze užít právě takové urychlující napětí, které postačuje pro vytvoření povlaku s požadovanými parametry a nezpůsobuje přitom příliš vysoký ohřev substrátu.¹¹ Možnost vytváření plazmatu v zařízeních pracujících na principu PECVD může být výhodně využita i k čištění povrchu předmětů odprašováním bezprostředně před depozicí vrstev. Tím lze příznivě ovlivnit adhezi tenkých vrstev vytvářených CVD procesem při nízkých teplotách.

1.4. PVD povlakování

Metoda PVD (Physical Vapour Deposition) se začala prosazovat v 80. letech. Je charakteristická nízkými pracovními teplotami (pod 600 °C). Tato metoda byla původně vyvinuta pro povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí, v současné době se začíná prosazovat i u břitových destiček ze slinutého karbidu, určených pro přerušovaný řez (frézování).¹¹ Tzv. Iontové plátování dovoluje efektivně nanášet povlaky rozmanitého složení, vynikajících mechanickým vlastností a atraktivního vzhledu i na tepelně zušlechťené materiály, nebo dokonce na plasty. Při iontovém plátování (ion plating) roste nanášená vrstva kondenzací z plynného skupenství za velmi nízkého tlaku (typicky 0,01 – 10 Pa.). Látka určená k nanášení se do plynného skupenství převádí fyzikálním procesem (odpařování či rozprašování) přímo ve vakuové komoře v průběhu povlakování. U iontového plátování dopadají ionty z plazmatu i na povlakovaný předmět. Jejich energie je určena elektrickým napětím U_b přivá-

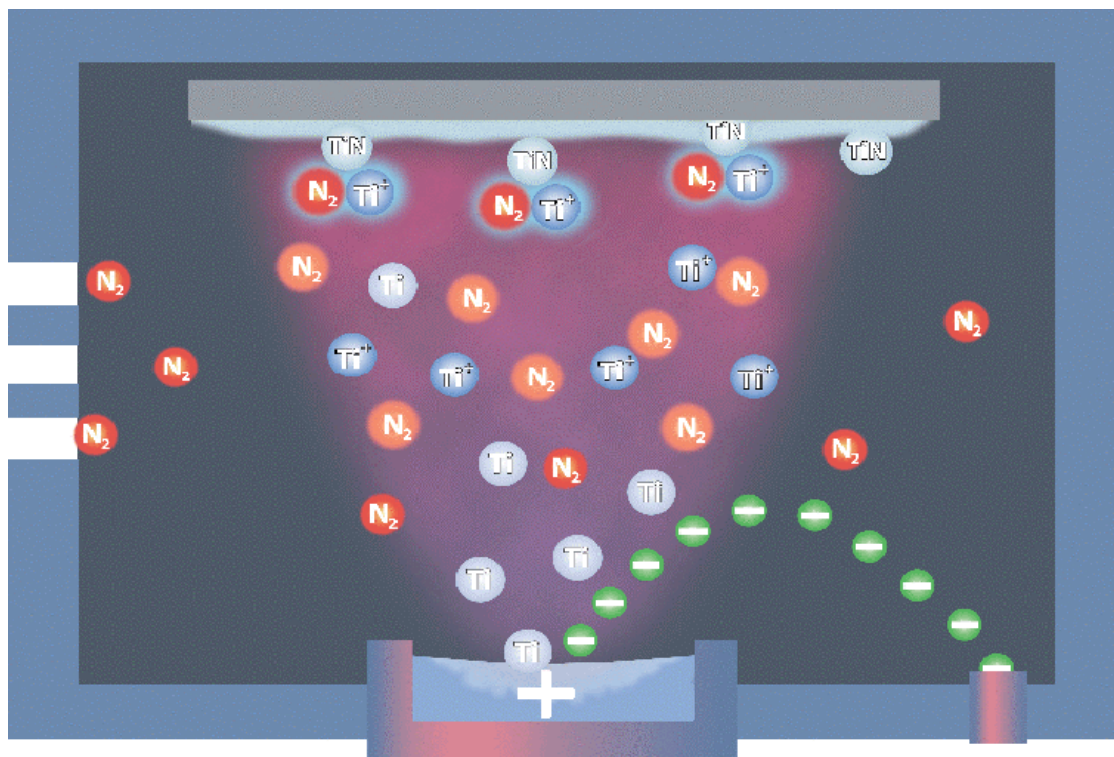
děným na povlakovaný předmět. To umožňuje připravit povrch před depozicí vrstvy (iontové čištění) a odstraňovat huře vázané atomy z rostoucí vrstvy jejich odprášením. Dopad iontů během nanášení výrazně ovlivňuje vlastnosti výsledné vrstvy (například tvrdost, vnitřní pnutí, adhezi k substrátu) a rovněž dovolu je vznik sloučenin při teplotě podstatně nižší, než odpovídá rovnovážné chemické reakci.

Metoda PVD vytváří tlaková zbytková pnutí v povlaku, nemá nepříznivý vliv na vlastnosti podkladu a je schopna povlakovat i ostré hrany. Projevuje se zde směrový efekt – na plochách odvrácených od místa odpařování zůstává menší tloušťka povlaku. Běžná tloušťka povlaku je 3 – 5 μm .

Podle způsobu emise atomů povlakovací látky do plynného skupenství můžeme rozlišit 3 základní metody iontového plátování: Napařování s přidavnou ionizací, obloukové napařování a napařování.³⁰

1.4.1 Napařování s přidavnou ionizací

Nanášená látka je ve vakuové komoře odpařována (průchodem proudu, induktivně nebo elektronovým svazkem) a takto uvolněné atomy jsou před dopadem na povlakovaný předmět částečně ionizovány např. svazkem elektronů (obr. 2).



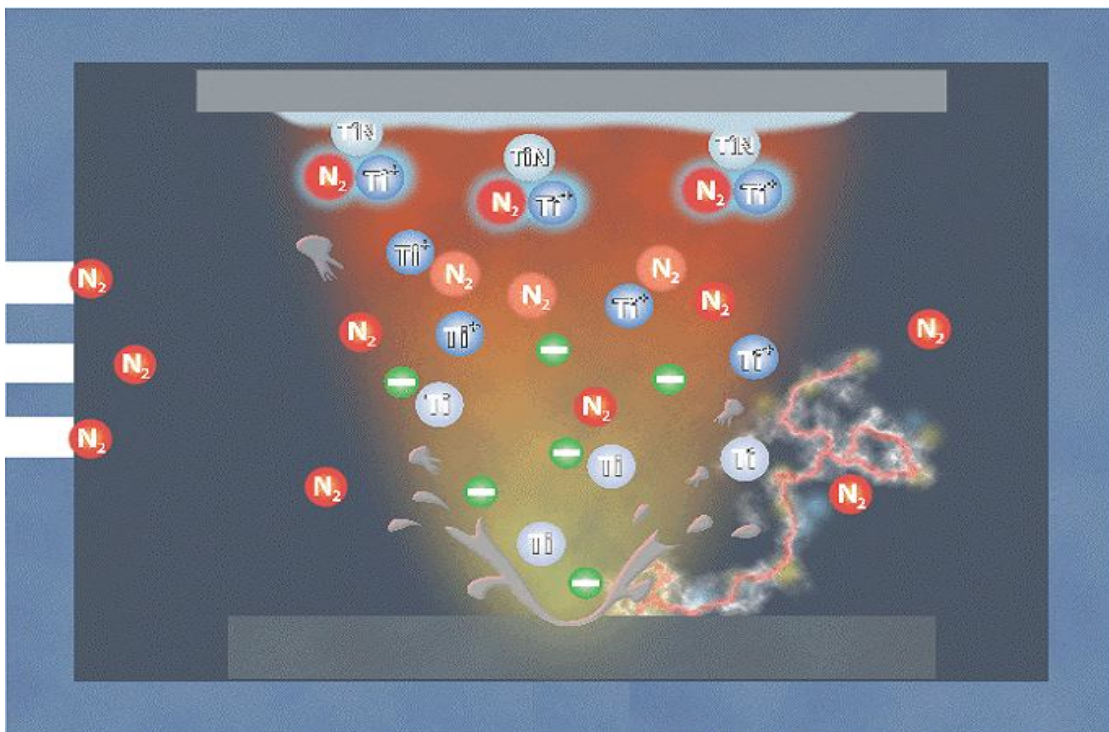
Obr. 2 Technologie napařování s přidavnou ionizací²¹

Lze pracovat v čistém vakuu – bez pomocného plynu (Ar). Proces nanášení je velmi stabilní. Odpařovaná látka je v kapalném stavu, takže její zdroj (odpařovač) musí být uložen vodorovně v dolní části povlakovací komory. Povlakovací materiály mohou být spojovány, mícháány, a legovány, mohou být i nanášeny jako čisté látky, které se vyskytují v pevnější formě. U vícekompo-

nentních povlaků může díky rozdílnému bodu tání jednotlivých komponentů dojít k ochuzení o snadněji odpařitelné komponenty povlaku. Řešením je povlakovací látky od sebe izolovat ve zvláštních oddělených odparnicích. Přesto má takové oddělení látek od sebe velká omezení. Tato metoda není vhodná k nanášení slitin.^{3, 30}

1.4.2. Obloukové napařování

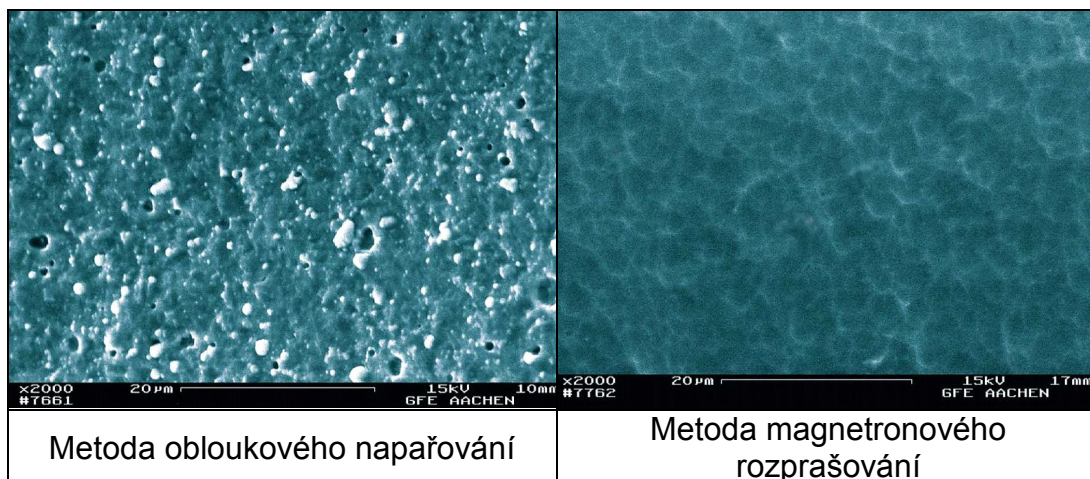
Nanášená látka je katodou (terčem) vakuového obloukového výboje (anodou bývá vakuová komora) a je jím lokálně odpařována a současně ionizována (obr. 3). Katoda jako celek zůstává pevná, taví se jen v místě katodové skvrny výboje, kde hoří oblouk o průměru řádově 10 μm a dosahuje teploty až 15 000 $^{\circ}\text{C}$. Za těchto podmínek lze odpařit téměř jakýkoliv vodivý materiál. Oblouk se po povrchu katody pohybuje zcela náhodně. Tento náhodný pohyb lze magnetickým polem usměrnit v tzv. řízený oblouk a tak zvýšit kvalitu vrstev i využití terče. Materiál je obloukem odpařován z terčů a zároveň je jím i ionizován (atomy materiálu se mění z elektricky neutrálních na atomy s nábojem). Ionizovaný materiál (např. Ti^+ , Ti^{2+} atd.) je urychlován směrem k nástrojům záporným předpětím, které je na ně přiloženo. Cestou ionizuje ještě atomy plynné atmosféry (např. N_2). Ionizované atomy po dosažení povrchu nástrojů vytvářejí povrchovými reakcemi vlastní deponovanou vrstvu.^{10, 30}



Obr. 3 Technologie obloukového napařování²¹

Výhodou této metody v porovnání s magnetronovým rozprašováním byla zlepšená přilnavost vrstvy k substrátu díky vysoké ionizaci odpařené látky. Nicméně dnešní technologie magnetronového rozprašování se dokáže adhezí povlaku vyrovnat obloukovému napařování. Vyšší rychlost odpařování povlakovacího materiálu z terčů umožňuje kratší čas povlakování.

Nevýhodou výsledného povlaku je přítomnost makročástic, jsou to drobné kapičky odpařovaného kovu. Ty negativně ovlivňují některé jeho vlastnosti, jako povrchovou drsnost, koeficient tření nebo odolnost proti korozi. Povrch nástroje je díky těmto makročástečím matný a porézní (obr. 4).



Obr. 4 Porovnání povrchu povlaků ²¹

1.4.3. Klasické napařování

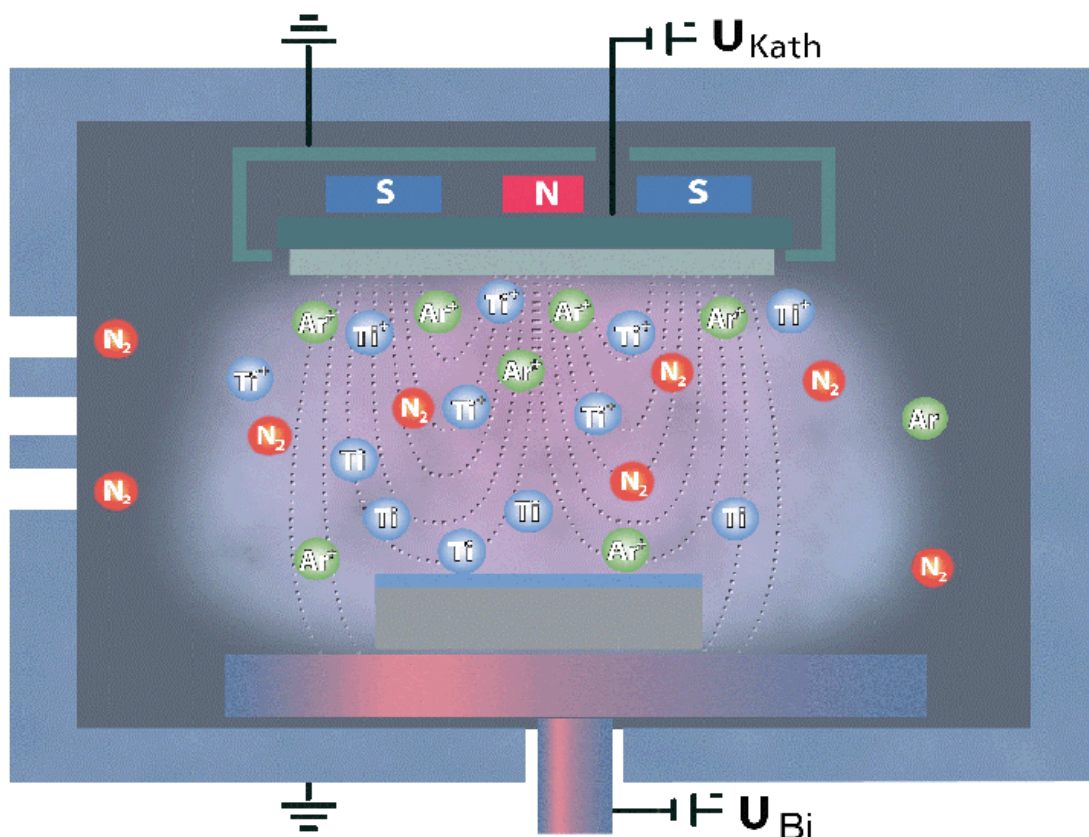
Klasický magnetronový systém je diodový systém využívající magnetické pole. Katodou, na kterou je připojeno záporné napětí ze zdroje, je terč z materiálu, který chceme rozprašovat. Anodou je substrát, na který je vrstva nanášena. Anoda může být:

- Uzemněná
- Na plovoucím potenciálu
- Na předpětí

V případě uzemnění není anodou pouze substrát, ale také stěny komory, která je také uzemněna. Předpětí může být kladné i záporné a patří mez významné parametry.¹⁹ Do komory se přes jehlový ventil připouští pracovní plyn (obvykle argon) a tlak se udržuje na hodnotě řádově jednotky Pa. Pod účinkem elektrického pole katody jsou volné elektrony na základě svého negativního náboje urychleny k anodě. Přitom se srážejí s atomy argonu. Při těchto kolizích jsou lavinovitě uvolňovány další elektrony a dochází k ionizaci plynu. Se stoupajícím stupněm ionizace se stává vakuová atmosféra vodivou, takže dojde k zažehnutí elektrického oblouku. Pozitivně nabitě ionty narážejí s velkou energií na terč a uvolňují z nich během impulsového nebo stálého působení atomy. Z katody uvolněné částice zesilují povrch substrátu a vytváří homogenní povlak.³

1.4.4. Magnetronové naprašování

Nanášená látka je katodou (terčem) magnetronového výboje. Výboj hoří ve velmi zředěném inertním plynu (zpravidla Ar) ve vakuové komoře (obr. 5). Nad záporně nabitým terčem (500 až 1000 V) se udržuje argonové plazma, jehož kladné ionty jsou elektrickým polem urychleny na terč a při dopadu jej rozprašují. Před terčem je vytvořeno magnetické pole definovaného tvaru elektromagnetem nebo permanentními magnety. Takové zařízení se nazývá magnetron.³⁰ Elektrony, které při klasickém naprašování unikají z prostoru před terčem, se v tomto případě v důsledku Lorentzovy síly musí pohybovat po šroubovici podél siločar. Tak se výrazně prodlužuje jejich dráha v blízkosti terče, prodlužuje se i doba jejich setrvání v oblasti výboje a zvyšuje se pravděpodobnost ionizace dalších atomů pracovního plynu. To umožňuje udržet výboj při nižším tlaku (řádově desetiny Pa) i při nižším napětí (řádově stovky voltů). Zejména nižší tlak se pozitivně projevuje ve větší čistotě vytvářených vrstev.¹⁷



Obr. 5 Technologie magnetronového rozprašování ²¹

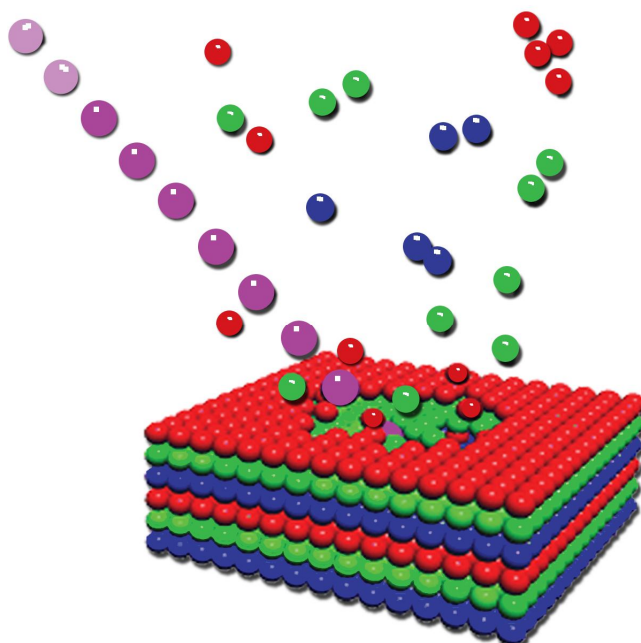
Výhodou magnetronového naprašování je rovněž velmi variabilní uspořádání (obdélníková, kruhová či jiná katoda v libovolné poloze). Lze naprašovat libovolný materiál včetně slitin a neovodičů, rychlost je ale nižší než u vypařování. Pro udržení výboje je nezbytný pomocný inertní plyn (Ar). Vrstvy neobsahují makročástice vyskytující se u obloukového odpařování. Snadno lze nanášet povlaky tvořené více vrstvami různého chemického složení (multivrstvy) a povlaky s průběžně se měnícím složením (gradientní vrstvy).

Jak je vidět, každá z PVD metod má svá pro i proti a vždy záleží na stanovení priority vlastností finálního výrobku (včetně ceny). Spojením obloukové a magnetronové technologie vznikla metoda ABS (Arc Bond Sputtering), která používá obloukové napařování v počátečních fázích povlakovacího procesu k dobrému ukotvení vrstvy do substrátu a zbytek povlaku je naprášen magnetronem.³⁰

Jestliže se spolu s pracovním plynem připouští do vakuové komory reaktivní příměs, např. kyslík, dusík apod., je možné vytvářet oxidy, nitridy atd. rozprašovaného materiálu. V tom případě jde o reaktivní magnetronové napařování.

U nevodivých terčů na povrchu postupně vzniká elektrický náboj, který zabraňuje dalšímu bombardování. Použije-li se střídavý vysokofrekvenční signál, lze rozprašovat i nevodivé materiály, např. různé keramiky. V tom případě se během jedné půlperrody rozprašuje terč a během druhé půlperrody opačná polarita vede k neutralizaci nahromaděného náboje dopadajícími ionty a opět je možný proces bombardování při následné změně polarity elektrického pole.¹⁷ Nicméně pro přípravu elektricky nevodivých povlaků se častěji využívá rozprašování vodivého terče, kdy je povlak vytvořen sloučením atomů terče a pracovního plynu.

Díky tomu, že technologie rozprašování je založena na principu nárazu urychlené částice s kladným nábojem na záporně nabitý terč, jehož částice jsou rozprašovány (obr. 6), přináší tato metoda výhodu v napařování i těžko-tavitelných materiálů. Ve vytvářené vrstvě se rovněž zachovává složení slitinového terče ve stejném poměru jednotlivých složek a je možná homogenní depozice vrstev i na větších plochách.¹⁷ Častěji než slitinové terče se používají terče s oddělenými povlakovacími prvky v čistém stavu. Výsledný povlak je vytvořen kombinací těchto prvků ve zionizovaném stavu v poměrech, které jsou na terči. Více o těchto terčích v kapitole 4.4.



Obr. 6 Sputtering¹⁹

2. Rozbor problematiky přípravy nástroje před povlakováním metodou PVD

Dokonalá příprava nástroje před samotným procesem povlakování je neopodstatněným prvkem, který nesmí být opomenut. V zásadě můžeme rozlišit přípravu stopkových nástrojů jako jsou vrtáky, závitníky, výstružníky a monolitní stopkové frézy a přípravu odvalovacích fréz. Odlišnosti v přípravě nástroje je možno najít i u použitého materiálu z něhož je nástroj zhotoven. Například výstružník vyrobený z cermetu prochází zcela odlišnou přípravou než odvalovací fréza z HSS. Účelem přípravy nástroje je zajištění dokonale čistého, odmaštěného povrchu, zbaveného prachu, zbytků abraziva, otřepů na ostří po přebroušování. Některé nástroje vyžadují i jisté zaoblení ostrých hran, které vzniknou po procesu broušení. Všechny tyto úkony v přípravě vedou zejména k zaručení dobré adheze povlaku k substrátu, zvýšení výkonnosti nástroje a následné zlepšení kvality obrobeného povrchu.

2.1. Druhy předdepozičních příprav

Jako materiály pro povlakované řezné nástroje se dnes majoritně používají rychlořezné oceli a slinuté karbidy. Zvláště u slinutých karbidů je třeba přípravě nástroje na depozici věnovat zvýšenou pozornost z důvodu vysoké křehkosti materiálu a náchylnosti ostrých hran k odštípnutí. Je třeba se vyhnout prudkým nárazům při manipulaci s nástroji, jejich vzájemnému kontaktu a také příliš dlouhému procesu čištění v ultrazvukové lázni. Pro některé řezné materiály, např. cermety dokonce není vhodné použít ultrazvuk pro očištění „U nástrojů ze slinutého karbidu a rychlořezné oceli se provádí úprava řezných hran některým ze způsobů finišování povrchu – otryskávání, mokré pískování, kartáčování nebo omílání. Po takovéto úpravě povrchu následuje chemické čištění v ultrazvukové lázni a osušení nástroje. Nakonec se nástroje upevňují do držáků, které se pak vloží do depoziční komory. V depoziční komoře následuje poslední etapa čištění substrátu – iontové čištění, na které bezprostředně navazuje depozice tenké vrstvy. Všechny tyto procesy mohou podstatně ovlivnit vlastnosti výsledného systému tenká vrstva substrát. V případě redepozice nástroje, který byl již dříve povlakován, předchází všem těmto procesům ještě proces odstranění vrstvy – tzv. stripping.“²³

2.1.1 Úprava ostří

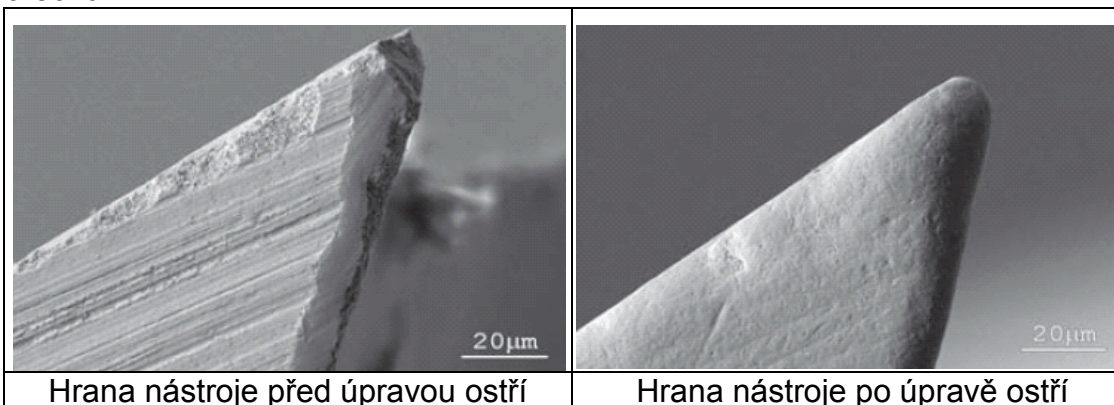
Hrany nástrojů z rychlořezné oceli a ze slinutého karbidu jsou po broušení různě „otřepené“ a plné defektů. Lokality s těmito defekty jsou velmi náchylné na porušení tenké vrstvy po jejich napovlakování. Na ostrých hranách dochází nejdříve k adhezivně - kohezivnímu porušení tenké vrstvy při řezném procesu. Ostré hrany mohou být často koncentrátorem napětí a způsobit porušení tenké vrstvy ještě před nasazením nástroje při obrábění z důvodu zbytkových pnutí v tenké vrstvě.“²³

Hrany nástrojů je možno upravovat omíláním, otryskáváním, pískováním, kartáčováním, lapováním a jinými metodami. Při těchto způsobech dochází ke změně mikrogeometrie řádově v mikrometrech (obr. 7). Avšak výsledný efekt může zvýšit životnost nástroje až o 200%. Dojde k zarovnání nerovností po

brusných zrnech, ostré hrany se zaoblí a díky působení mikročastic, jimiž je realizováno omílání nebo tryskání dojde k jemnému zdrsnění povrchu, čímž se zvýší adheze povlaku k substrátu.

Omílání

Omílání v granulátech s brusnou suspenzí je metoda dobře reprodukovatelná, se kterou je možno docílit dobrých výsledků, a to i pro větší a rozmanitější série. Jako granulát může být použita celá řada materiálů, od granulátů na bázi oxidů některých kovů přes keramická tělíska až po drcené skořápky ořechů.²⁷



Obr. 7 Porovnání ostří před úpravou ostří a po úpravě²³

Kartáčování

Dalším způsobem úpravy řezných hran je jejich omílání kartáčem s různými druhy vláken. Z hlediska tvrdosti slinutého karbidu jsou jako materiály vláken používány ocel, popřípadě různá tvrdá polymerní vlákna impregnovaná abrazivem⁵. U této metody je docílena dobrá reprodukovatelnost poměrně v krátkém čase. Vedle spousty výhod této metody je zde jedna nevýhoda spočívající v nalepování plastového materiálu z vláken na ostří nástrojů. Plast je ale velmi obtížně odstranitelný.²³

Pískování

Pískování – resp. mikropískování, je vhodná průmyslová metoda pro případ sériové výroby vhodných substrátů nebo pro speciální případy. Pískováním lze odstranit pevně ulpívající nečistoty na povrchu, případně i nečistoty uchycené v mírně pórovitém povrchu. To jsou případy nebroušených slinovaných ploch SK nebo opotřebovaných a neobnovených ploch přebroušovaných nástrojů. U SK slouží mikropískování rovněž k odstranění kobaltového leachingu (zpasivovaná vrstva oxidu kobaltu) a kobaltového schmearingu (kobaltové pojivo, jenž se rozmazalo po zrnech pevné fáze při broušení). Leaching a schmearing mají nepříznivý vliv na adhezi povlaku k substrátu.

Jako vhodné médium se používá abrazivo SiC nebo Al₂O₃. Některá běžně používaná média nejsou vyloženě vhodná, protože jejich rezidua negativně ovlivňují adhezi povlaků. Velikost abrazivních zrn se pohybuje v nízkých hod-

notách 20 až 100 μm . Technologie pískování musí vždy respektovat charakter nástroje, jeho funkční břity a plochy. Proto i volba parametrů pískování a řešení automatizace procesu jsou záležitostí do značné míry empirickou. Bez dlouhodobých seriózních experimentů nelze zabránit případným negativním vlivům – nevhodné zaoblení hran, odpískování měkčích fází (pájené nástroje) nebo zmatnění zrcadlových dekorativních či upínacích ploch. Mikropískování je možné provádět za sucha, nebo za mokra.²⁹

U suchého mikropískování jsou částice abraziva unášeny proudem stlačeného vzduchu. Částice dopadají na povrch nástroje rychlostí až 700 km/h, dochází k abrazivnímu čištění jehož rozsah závisí na mnoha faktorech – rychlost a úhel dopadu částic, jejich hmotnost a tvar.²³

U mokrého pískování jsou částice abraziva smíchány s vodním roztokem a pod vysokým tlakem tryskány proti nástroji. Oproti pískování za sucha má tato metoda několik výhod: povrch není impregnován částicemi abraziva, v pracovním prostoru se nepráší, neexistuje tepelné ovlivnění, automatizovaný provoz, menší agresivita abraze, rovnoměrná abraze, sametově hladký povrch, dodržení těsných tolerancí aj.

Jako vhodné médium se používá nejčastěji abrazivo SiC nebo Al_2O_3 . Některá běžně používaná média nejsou vyloženě vhodná, protože jejich rezidua negativně ovlivňují adhezi povlaků. Velikost abrazivních zrn se pohybuje v nízkých hodnotách 20 až 100 μm . U mokrého pískování až 5 μm .

Jiná média jsou:

- přírodní oxidy – hlavně minerální abraziva, od písků na bázi křemíku se z důvodu nebezpečí silikózy upouští,
- kovová abraziva – např. broky – jsou vhodné na objemnější nástroje,
- struska.²³

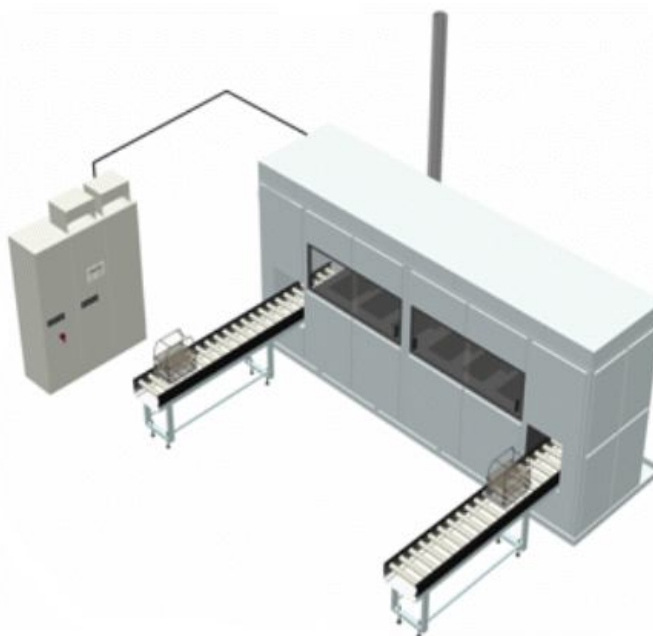
2.1.2. Odmaštění

Odstranění konzervačních a jiných mastných látek z povrchů nástrojů se provádělo klasicky pomocí benzínu a petroleje. Dnes jsou tyto neekologické a nehygienické látky nahrazeny průmyslovými odmašťovacími opěť na bázi ropných derivátů, ale s vlastnostmi odpovídajícími přísným ekologickým normám. Odmašťovací prostředky obsahují dearomatizované uhlovodíky a tenzidy bránící nadměrnému odpařování a zajišťující dobrou smáčivost. Odmaštění se provádí v běžně dostupných jednoduchých odmašťovacích zařízeních podle kapacitních potřeb či velikosti nástrojů. Odmaštění může být provedeno současně i při mokrému čištění.

2.1.3. Mokré čištění

Představuje kombinované metody využívající oplachy, tlakové oplachy, ultrazvuk, elektrochemické metody, vakuové sušení, odstředění, vyhřátí, odpaření tekavých kapalin. Jako průmyslová zařízení jsou využívány mycí linky (obr. 8) s několika samostatnými mycími a oplachovými vanami, případně jednovanové systémy s automatickou výměnou jednotlivých technologických láz-

ní. Používají se většinou kapalně čistící prostředky, které se dávkovacím čerpadlem dodávají přímo do mycí lázně.



Obr. 8 Mycí linka²¹

Čištění probíhá v alkalickém prostředí – nejběžnější je čištění v roztocích obsahujících KOH či NaOH. Pro zvýšení odmašťovacího účinku mohou být kombinovány s malými přídávky tenzidů (smáčedel), popř. i kyseliny citronové či fosforečné. V některých případech čistící linky kombinují v oddělených nádobách zásadité a kyselé prostředí, čímž se může dosahovat zvýšeného čistícího účinku. Veškeré čistící lázně se provádějí v roztocích s demineralizovanou vodou. Po takto provedeném čištění následují oplachy, které však musí nejen odstraňovat zbytky čistících lázní, ale i chránit očištěný povrch proti korozi pasivátorem. Pro účely povlakování nejlépe vyhovují pasivátory s krátkou dobou působení do 2 dnů. Pasivátory se kombinují s oplachovými lázněmi, u nichž je naprosto nezbytné minimalizovat obsahy solí a jiných rozpuštěných látek ve vodě. Proto je nutné používat velmi čisté oplachové vody. Vodivost použité demineralizované vody by se měla pohybovat v řádu desetin $\mu\text{S}/\text{cm}$. Takto zvolené prostředky krátkodobé ochrany nesmí negativně působit na adhezi připravovaných vrstev. Pasivátory mohou obsahovat neionogenní tenzidy, organické soli a alkoholy.

Pro zajištění kvalitního povrchu bez zbytkových map je potřeba dosáhnout rychlého osušení smáčených povrchů. K tomu jsou používány různé metody založené na odstředění zbytkové kapaliny a na odpaření zbytkové kapaliny na vzduchu či ve vakuu.²⁹

2.1.4. Odjehlení

Odjehlení je standardní způsob úpravy nástrojů z HSS před povlakováním zpravidla aplikovaný již výrobcí nástrojů. Provádí se kartáčováním nebo ručním odjehlením pomocí pilníků nebo abrazivních tkanin. Odjehlování nástrojů jako např. odvalovacích fréz může být prováděno i otryskáváním skleněnými kuličkami pod stanoveným úhlem a tlakem otryskávání (obr. 9). Dokonalé odjehlení je dokonáno mokrým pískováním při zaoblování hran.



Obr. 9 Zařízení pro otryskávání skleněnými kuličkami

2.1.5. Iontové čištění

Principem iontového čištění (též nazýváno iontový bombard nebo iontové leptání) je přivedení záporného předpětí na substrát a dopad urychlených iontů na substrát. Ionty při dopadu na substrát vyrážejí mikronečistoty ulpěné na povrchu. Iontový bombard má většinou dvě fáze. V první fázi (čištění doutnavým výbojem) dochází k ionizaci atomů plynu, který je vpuštěn do komory. Takovým plynem je například Ar nebo Kr. Ionizované atomy plynu jsou záporným předpětím substrátu urychlovány a dopadají na substrát, ze kterého vyrážejí atomy nečistot. Druhá fáze (probíhá u povlakování nízkonapěťovým obloukem) pokračuje vypuštěním komory a přiložením nízkonapěťového zdroje elektrického oblouku na depoziční katody. Na katodě se vytvoří katodová skvrna, která je pak zdrojem iontů, které jsou opět záporným předpětím urychlovány na substrát. Dopadem těchto iontů je substrát dočištěn. Při iontovém čištění dochází při větších energiích a delším čase k intenzivnímu očištění substrátu a také k částečnému odprášení povrchu. Větším stupněm odprášení jsou postiženy samozřejmě fáze s menší kohezní pevností a nižší tvrdostí. Při nekontrolovaném iontovém bombardu mohou z povrchu zřetelně vystoupit karbidy, které se vyznačují vysokou tvrdostí. Okolní matrice může být částečně odprášena. Odprášení kobaltového pojiva u substrátu ze slinutého karbidu, s sebou přináší riziko v možném narušení soudržnosti substrátu a rozvoj trhlin v místech, kde je iontovým bombardem kobaltová vazba narušena.²³

2.1.6. Stripping

Strippingem se rozumí odstranění staré vrstvy z již použitého nástroje před nanesením nového povlaku. Stripping je prováděn chemickou nebo elektrochemickou cestou a využívá silných oxidačních činidel popř. účinku elektrického proudu. V závislosti na odpovlakovaném substrátu rozlišujeme stripping rychlořezných ocelí a slinutého karbidu. Více o strippingu ve 3. části.

2.2. Příprava stopkových nástrojů ve spol. CemeCon

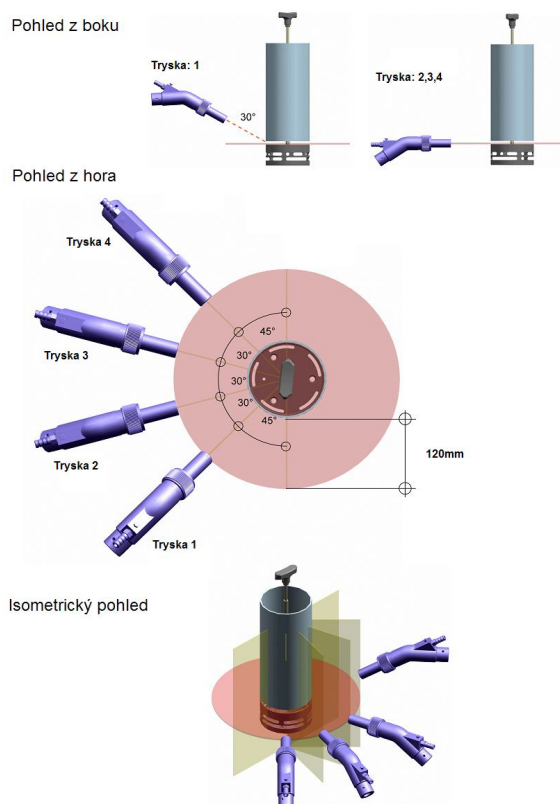
Po zavedení nástrojů do evidence je třeba nástroje zbavit mastnoty a nečistot které zbyly na povrchu při opětovném přeoštění. Nástroje se vyjmou z ochranných pouzder a vloží do čistícího držáku. Ten obsahuje vyjímatelné rošty. Každý rošt obsahuje 7 nebo 13 děr pro různé průměry nástrojů. Do jednoho čistícího držáku je možno vložit až 12 roštů.

Čistící držák se vloží do mycího zařízení EUROCOLD. Navolí se příslušný program mytí a tlačítkem start se spustí proces. Program má mnoho fází, dvojnásobné čištění ultrazvukem v roztoku demineralizované vody a čistícího prostředku Dansoclean 6114, oplachování pod sprchou a vpouštění páry do mycí komory. Vše končí finálním čištěním ultrazvukem v demineralizované vodě a trojnásobným vysoušením. Při vysoušení je z komory odsát vzduch a nástroje jsou ohřívány a ochlazovány. Tímto se zaručí odstranění vody z nástrojů.

Další fází přípravy nástrojů je fáze mokrého pískování. Nástroje jsou přemístěny z čistícího držáku do pouzder v pískovacím držáku. Do pískovacího držáku je možno vložit v závislosti na průměru nástroje až 20 pouzder naráz. Rozestup pouzder musí být zvolen takový, aby se nástroje navzájem nedotýkaly. Pískovací držák musí být zcela zaplněn, pokud tomu tak není, nahradí se prázdná místa prázdnými pouzdry. Pískuje se pouze funkční plocha nástroje, nefunkční plochu zakrývá pouzdro.

Držák se umístí na unašeč, který jej zavede do pracovního prostoru stroje. Zvolí se program pískování. Na nástroje je ze čtyř trysek přiváděna pod vysokým tlakem 2 – 4,5 barů (v závislosti na typu substrátu) směs vody, čistícího roztoku a upraveného korundu. Trysky jsou nastaveny pod různými úhly (obr. 10). Za současného točení držáku a pouzder se všechny čtyři trysky pohybují nahoru a dolů. Kombinací těchto pohybů je zaručeno rovnoměrné opískování celého povrchu nástroje. Po ukončení procesu se unašeč přesune mimo pracovní prostor, držák je možno vyjmout a přemístit jej na oplachovací zařízení. Zde je držák s nástroji opláchnut roztokem vody a antikoročního přípravku a poté vysušen proudem stlačeného vzduchu. Tímto se odstraní zbytky pískovacího prostředku.

Poslední procesem před samotným povlakováním je poslední čištění nástrojů. Ty jsou vyjmuty z pískovacích pouzder a opět vloženy do čistících držáků. Nástroje jsou opět čištěny v ultrazvukové myčce EUROCOLD.



Obr. 10 Nastavení trysek u mokrého pískování stopkových nástrojů ¹⁴

2.3. Příprava odvalovacích fréz ve spol. CemeCon

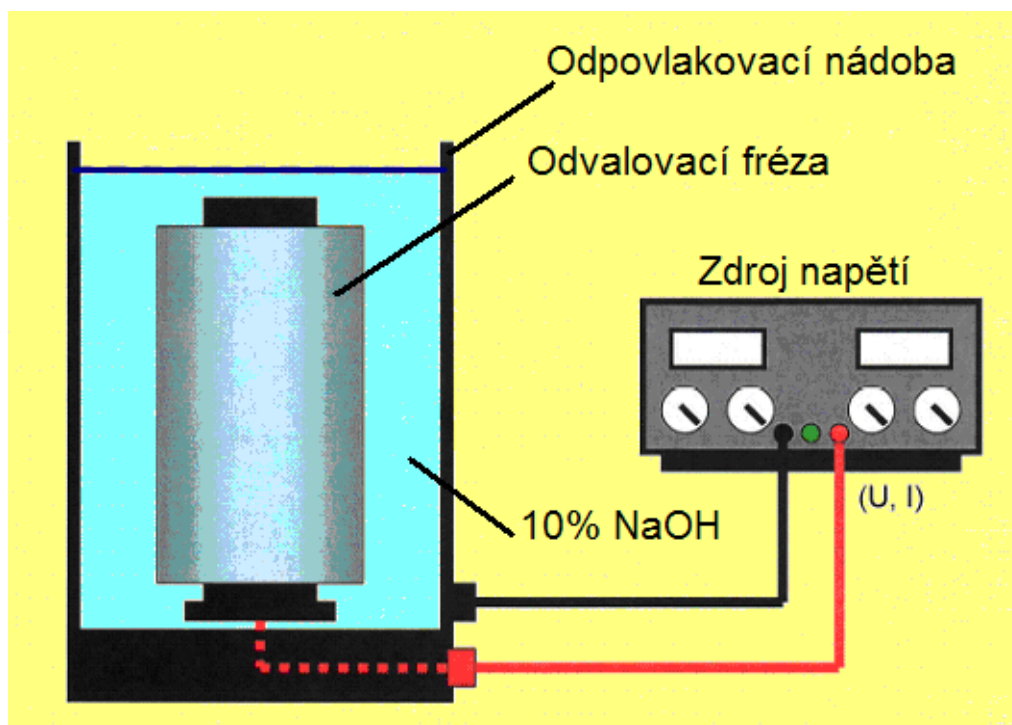
Na rozdíl od stopkových nástrojů je třeba odvalovací frézy zbavit starého povlaku. Toho se docílí chemickou nebo elektrochemickou cestou, v závislosti na druhu povlaku. Dříve se postupovalo tak, že frézy šly nejdříve na odpovlakování, poté byly odesílány zpět na přeostržení a pak zpátky na povlakování. Tímto docházelo ke ztrátám na čas a na nákladech za dopravu. Postupem času se vytvořily šetrné metody odpovlakování, které neponičily HSS substrát a tak se dnes již mohou odpovlakovat naostřené frézy. Ušetří se tím náklady na čas a dopravu. Odvalovací frézy je třeba odpovlakovat i proto, aby mohlo (podobně jako u stopkových nástrojů) být mírně zaobleno ostří frézy a tím zaručena jak lepší adheze povlaku k substrátu, tak i předejití odlupování nových povlaků na základu ze starého povlaku.

2.3.1. Odpovlakování elektrochemickou cestou

Elektrochemické odpovlakování je používáno pro odstranění povlaků, jenž nejdou odstranit chemicky. Jsou to zejména povlaky na bázi chrómu, jako AlCrN (Alcrona), CrN, CrC, CrCN, Cr.

Odpovlakování je prováděno na konstrukčně jednoduchém zařízení, vyvinutém jednoúčelově pro odpovlakování odvalovacích fréz. Zařízení se skládá ze zdroje stejnosměrného napětí a z nádoby, ke které je zdroj napětí připojen dvěma vodiči (obr. 11). Reakce odpovlakování probíhá v roztoku hydroxidu sodného (NaOH) o koncentraci 10%. Výstupní napětí je $U = 3,8V$ a výstupní

proud $I=10$ A. To odpovídá proudové hustotě $0,23 \text{ mA/mm}^2$ u odvalovacích fréz o $\varnothing 50 \text{ mm}$ a $0,12 \text{ mA/mm}^2$ u fréz o $\varnothing 90 \text{ mm}$. Doba odpovlakování je stanovena na 15 – 30 minut, v závislosti na složení povlaku a velikosti frézy (proudové hustotě). Toto odpovlakovací zařízení je výhradně určeno pro odpovlakování HSS fréz.



Obr. 11 Schéma zařízení pro elektrochemické odpovlakování

Před použitím zařízení musí být nádoba pro odpovlakování naplněna 10% hydroxidem sodným. Aby se předešlo přetečení hydroxidu poté co se vloží odvalovací fréza do nádrže, měla by být nádrž nejdříve naplněna 8 litry hydroxidu sodného. Poté, co je fréza vložena do odpovlakovacího zařízení, musí být hydroxid sodný doplněn do nádrže tak, aby byl nástroj zcela ponořen. Pokud to není možné splnit, z důvodu nedostatečné výšky nádoby, musí být ponořena alespoň řezná část nástroje.

Po splnění výše uvedených podmínek je třeba připevnit odsávací zařízení na horní okraj nádoby tak, aby vznikající výpary neohrožovaly obsluhu zařízení. Poté je zapojen zdroj stejnosměrného napětí a vyčkává se stanovenou dobu, dokud není povlak odstraněn (obr. 12). Po ukončení reakce je třeba frézu opláchnout od zbytku hydroxidu, a vysušit stlačeným vzduchem. Na povrchu frézy se mohou nacházet dohněda zbarvené zbytky povlaku, které jsou ale bez větších problémů odstraněny v následujících pískovacích operacích.

Při elektrochemickém odpovlakování je třeba dodržovat bezpečnostní pokyny a používat bezpečnostní pomůcky, aby se předešlo poleptáním hydroxidem nebo zasažením elektrickým proudem.



Fréza je vložena do odpovlakovacího zařízení. Zařízení musí být vypnuto!



Do zařízení je dolit hydroxid sodný až po okraj nádrže.



Veškerá funkční plocha frézy je ponořena v hydroxidu



Pokud nevypadá odpovlakování tak, jako na obrázku, je třeba zkontrolovat případnou závadu na zdroji napětí a nebo elektroinstalaci

Obr. 12 Příprava elektrochemického odpovlakování odvalovací frézy

2.3.2. Odpovlakování chemickou cestou

Odvalovací frézy jsou uchyceny do držáků a umístěny do koše tak, aby bylo zaručeno, že se nebudou navzájem dotýkat. V závislosti na průměru frézy je možno do koše vložit 8 – 12 odvalovacích fréz. Samotné odpovlakování probíhá v odpovlakovacím zařízení od společnosti KLN. Nádrž ve které odpovlakování probíhá má obsah 145 litrů. Ze všeho nejdřív je nádrž naplněna po plovák vodou a je spuštěn ohřev na teplotu 80 °C. Současně je spuštěno i odsávání par z nádrže. Do vody se nasype Decorem ST24 v množství cca. 12,5 kg. Do nádrže se nalije 50 litrů peroxidu vodíku o koncentraci 35 %. Množství peroxidu je dáno jeho koncentrací. Při větší koncentraci je možno nalít méně peroxidu. Při dosažení teploty 70 °C následuje vložení nástrojů umístěných v koši do lázně. To je realizováno za pomoci jeřábu. Ten zvedne koš a přemístí jej do nádrže. Pokud je třeba, doplní se nádrž vodou přibližně 1cm nad nejvyšším bodem nástrojů, aby se zaručilo dokonalé odpovlakování v celé délce nástroje. Voda se totiž během reakce odpařuje a hladina lázně by mohla poklesnout pod vrcholky nástrojů.

Nejúčinněji probíhá reakce při teplotě 80 °C. Pokud je ovšem v lázni příliš mnoho fréz, resp. celkový povrch fréz nad povolenou mez v kombinaci s vysokou teplotou roztoku, může dojít k bouřlivé reakci, poté zpravidla dochází k přelévání odpovlakovacího roztoku přes horní okraj nádrže. Proto je zařízení vybaveno i chladicím okruhem, který se automaticky spustí po překonání kritické teploty, jenž byla přednastavena. Rychlost reakce je přibližně 1 µm odstraněného povlaku za jednu hodinu. V okamžiku, kdy se odstraní poslední zbytek povlaku na nástroji, dojde k samovolnému ukončení reakce a nástroje mohou být vytaženy z lázně. Koš s nástroji se důkladně propláchne vodou a vysuší stlačeným vzduchem. Použitý roztok je pomocí čerpadla přemístěn do odpadové nádrže.



Obr. 13 Odvalovací frézy s povlakem a po odstranění povlaku

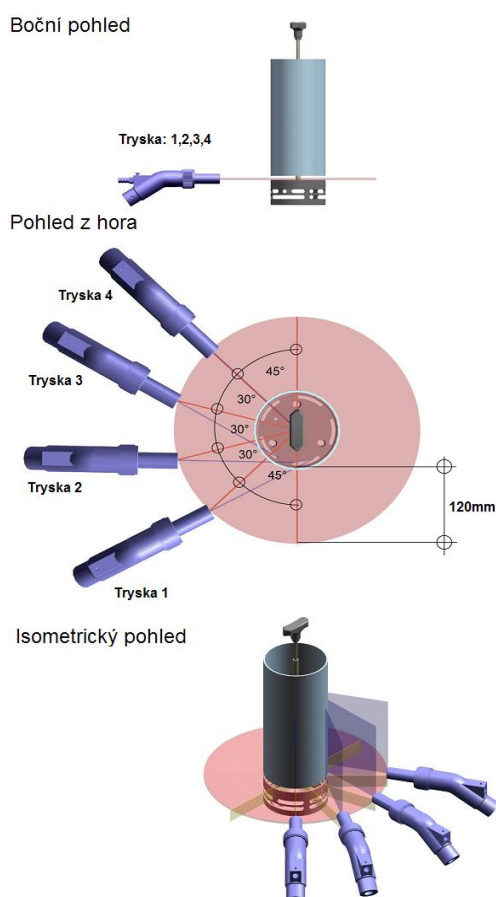
Po odpovlakování HSS fréz se musíme před dalším zpracováním ujistit, že z nástrojů byl po procesu odpovlakování odstraněn povlak na 100 %. Všechny nástroje (100%) jsou po odpovlakování podrobeny kontrole (obr. 13). K tomu může být použit stereo mikroskop s 50-ti násobným zvětšením, nebo lupa. Přitom je brán zřetel na kritické plochy ostří, čelní plochu a hřbetní plochu. Při nejistotě, zdali je plocha správně odpovlakována je možno použít k otestování E-stain (brusný kámen). Pokud je možno zbytek starého povlaku tímto způsobem odstranit, máme jistotu, že zbytky starých povlaků se podaří odstranit dalšími způsoby přípravy, tryskáním skleněnými kuličkami a mokřím pískováním. Pokud není možno povlak odstranit pomocí E-stain, musí být nástroj opět odpovlakován.

Otryskávání skleněnými kuličkami HSS nástrojů slouží hlavně k odstraňování otřepů. Může jím být odstraněn i zbytek starého povlaku, jenž se zcela nepodařilo odstranit při odpovlakování. Na přidržení odvalovací frézy slouží speciální přenosný držák nástrojů, jenž je umístěn v kabině zařízení. Na odvalovací frézy jsou tryskány skleněné kuličky jak na čelní, tak i na hřbetní plochu pod úhlem 25 – 30°. Tlak vzduchu je nastaven na 3,5 baru. Držák usnadňuje otá-

čení frézy okolo vlastní osy. Všechny zuby musí být dokonale otryskány. Po otryskání nástroje dojde ještě v kabině k jeho ofuku a výměně za jiný.

Podobně jako u stopkových nástrojů je třeba nově nabroušené hrany zaoblit pro zlepšení adheze povlaku a pro zlepšení řezných podmínek a kvality obrobené plochy. Odvalovací frézy v těch samých držácích v jakých byly odpovlakovány se vloží do unašečů v mokré pískovačce. Na pískovačce je nastaven program pískování a trysky se nastaví do požadované polohy (obr. 14).

Po ukončení pískování následuje oplach, osušení a mytí v ultrazvukové myčce, tak jako u stopkových nástrojů.

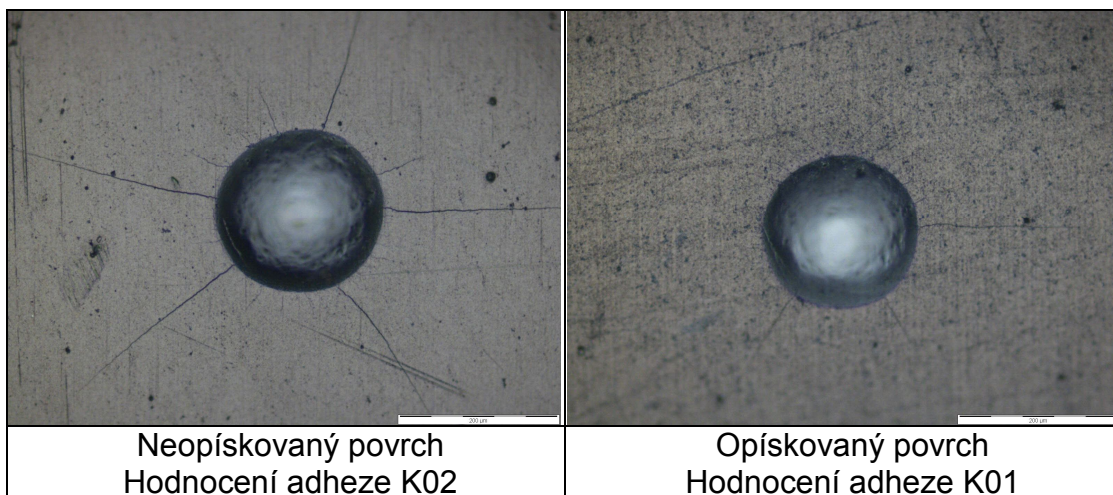


Obr. 14 Nastavení trysek u mokrého pískování odvalovacích fréz ¹⁴

2.4. Praktické posouzení důležitosti přípravy nástroje

Pro posouzení potřeby kvalitní přípravy podkladu před procesem povlakování ve vztahu adheze mezi substrátem a povlakem byl podroben testu váleček ze slinutého karbidu. Váleček byl do jedné čtvrtiny mikropískován, aby byl aktivován povrch pro lepší adhezi. Zbytek povrchu válečku byl krytý pískovacím pouzdem, tudíž nebyl opískován. Po ukončení mikropískování bylo možno zřetelně rozpoznat rozhraní mezi pískovaným a nepískovaným povrchem. Pro jistotu bylo toto rozhraní zvýrazněno vyjiskřením čáry.

Váleček byl poté spolu s jinými nástroji umístěn do ultrazvukové myčky. Po vytažení byl našaržován spolu s ostatními nástroji tak, aby byl napovlakován jak opískovaný, tak i neopískovaný povrch válečku. Test adheze byl proveden metodou „Mercedes test“ (více o testu v kapitole 4).

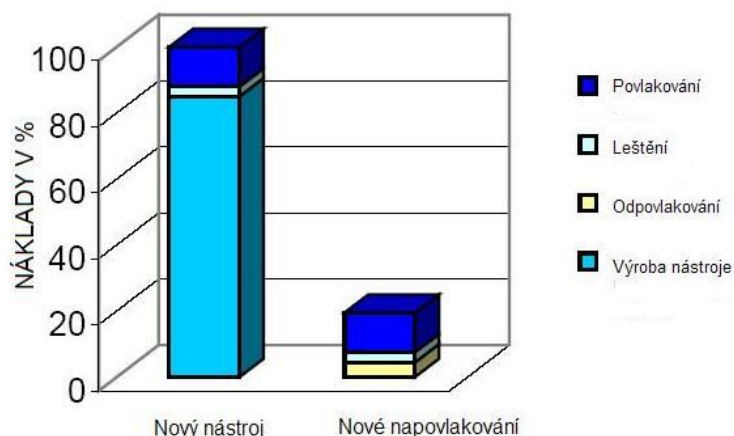


Obr. 15 Porovnání vtisků u testovaných ploch

Povrch válečku, který nebyl mikropískován vykazuje i když stále dobré, tak přesto o jeden stupeň horší adhezní vlastnosti v porovnání s povrchem, který byl řádně mikropískován a připraven na povlakování. Zde jen byla potvrzena důležitost řádné přípravy povrchu (obr. 15).

3. Realizace odstranění původního povlaku z vybraných řezných nástrojů

Metody odpovlakování slouží k renovaci nástrojů před jejich novým povlakováním. Pro vylepšení povrchových vlastností nástrojů z HSS a ze SK, stejně jako pro zvýšení životnosti a efektivnosti zvláště pak jednorázových vyměnitelných břitových destiček, vrtáků, fréz, nástrojů pro tváření a lisování, je v současnosti obvyklé nanášet povlaky z tvrdých materiálů. Nástroje ze slinutého karbidu a speciální nástroje se složitým ostřím jsou drahé, a proto je tu snaha zachránit tyto nástroje. Pokud je povlak porušen, nebo je nástroj opět přeostrěn je třeba jej opět napovlakovat. Aby nový povlak dobře plnil funkci, je třeba starý povlak odstranit. Odstranění těchto povlaků je obtížný a náročný problém, avšak díky odpovlakování může být jeden nástroj častěji využit a tímto i odpadají náklady na výrobu nového nástroje (obr. 16). Tento problém je přenesený k řešení, zdali je toto užití ekonomické v konečném součtu.

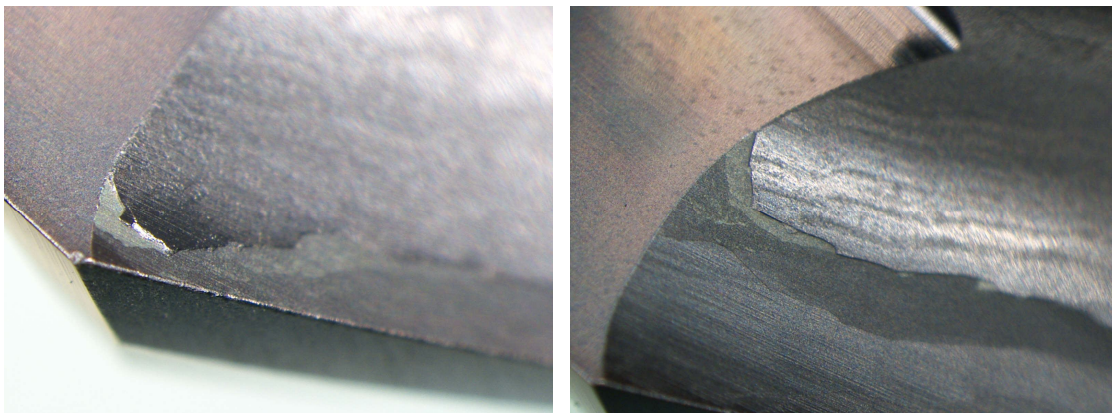


Obr. 16 Porovnání nákladů ³¹

Dalším z důležitých faktorů proč odstraňovat povlaky z nástrojů je vznik vnitřního napětí v povlaku. Podle druhu nástroje je možno napovlakovat nástroj bez předchozího odstranění starého povlaku. Pro tento účel jsou vhodné stopkové nástroje ze SK, jako frézy, vrtáky a odvalovací frézy. Tyto nástroje jsou osvobozeny od povlaku pouze na plochách jenž byly přebroušeny. Nicméně na zbývajících plochách nástroje povlak zůstává. Proto se během vícenásobného napovlakování tloušťka vrstev povlaku v místech která nebyla přebroušena zvyšuje. Tak jak se zvětšuje tloušťka vrstvy, tak se i zvyšuje vnitřní napětí v nástroji a povlaku. To vede k nižší životnosti nástroje v porovnání se životností nástroje, jenž byl napovlakován poprvé. Následkem přítomnosti starých povlaků na nástroji je i zhoršená adheze nově naneseného povlaku, který za pomoci vnitřního napětí ve starém povlaku může odpadat od povrchu nástroje.²¹

Příkladem je obr. 17 kde je zachycen povrch vícestupňového vrtáku, kde se nově nanesený povlak odtrhl společně se starým povlakem od substrátu, a tímto byla díky odkrytí ostří snížena životnost nástroje. Proto je objektem sou-

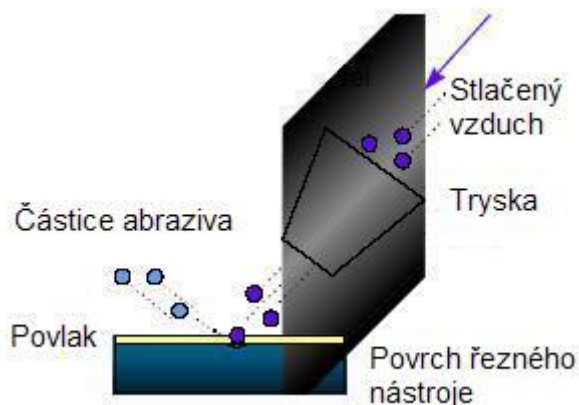
částečných výzkumů eliminace nevýhod z toho vyplývajících a realizace ekonomičtějšího odpovlakovacího procesu.



Obr. 17 Odlupování starých povlaků

3.1. Tryskání

Při tryskání je tryskací médium dodáváno pomocí stlačeného vzduchu hadicí přes výstupní trysku (obr. 18). Při nárazu částice na pevné těleso ulpívající na povrchu je těleso odstraněno. Principem tryskání je náraz jednotlivých částic pod určitým úhlem na povrch nástroje. Přes volně letící, narážející a nebo zarývající se abraziva je nástroj očištěn. Vznikající úběr značně závisí na předmětu, na zrnitosti, na rychlosti a úhlu nárazu částic abraziva. Avšak tento způsob má své negativní vlivy na jakost povrchu nástroje, na zvýšení drsnosti a zaoblení hran na pracovních plochách.



Obr. 18 Technologie tryskání ³

3.2. Tryskání suchým ledem

Od druhé poloviny 80. let bylo zkoušeno tryskání suchým ledem. Tryskání suchým ledem v porovnání s tryskáním pískem má rozdílný princip čištění.

Při dopadu částic suchého ledu je během doby kontaktu povrch ochlazen. Povlak zkřehne a smrští se. Při vzniklém teplotním napětí ztrácí povlak spojení se základovým materiálem a s pomocí kinetické energie dále dopada-

jících částic je povlak odstraněn. Oproti pískování se podkladová plocha nepoškozuje. Po dopadu přejdou částice suchého ledu samovolně do plynného skupenství.

Při delším setrvání na jednom místě dochází k podchlazení čištěné plochy a čistící efekt klesá. Z toho plyne, že teplotní rozdíly mezi opracovanou částí a částicemi suchého ledu by měly být co nejvyšší. Tvrdost částic suchého ledu se pohybuje mezi druhým a třetím stupněm Mohsovy stupnice. Pro optimální úběr by měla být nejmenší tvrdost částic pro tvrdé povlaky okolo devátého stupně. Proto je tento způsob pro odstranění tvrdých povlaků jen špatně použitelný a jeho přínos nestojí za větší pozornost.

3.3. Laser

Laserový puls generuje plasma, které na povrchu tryskaných materiálů vytvoří rázovou vlnu. Fotomechanický efekt má přitom za důsledek rozdrčení a ztrátu vnějšího povlaku, který je ve formě malých kousků odstraňován z nástroje. Při extrémně krátké době laserového pulsu nenastává žádná tepelná dilatace v hlouběji ležících povlacích a ani žádné ohřátí základového materiálu. Tímto je možno dosáhnout odstranění povlaků od vrchní vrstvy až po stanovenou hloubku.

Laser má ale problémy s odstraněním povlaků u nástrojů se složitými geometriemi, jako např. u válcových fréz, kdy se neustále mění vzdálenost zdroje laseru a povrchu nástroje. Ohnisková vzdálenost musí být neustále nově nastavována.

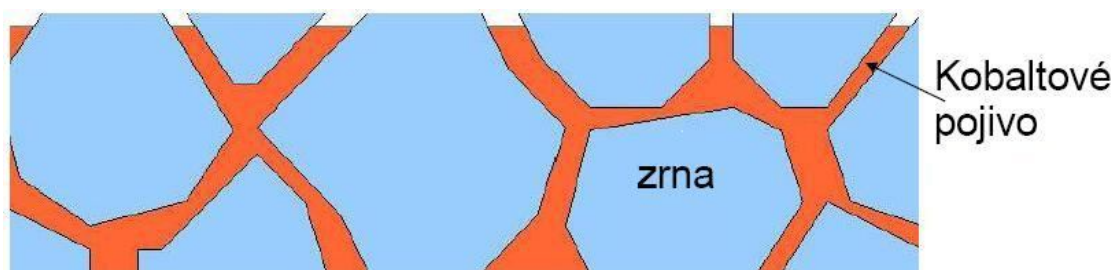
Laserový způsob odpovlakování může být porovnáván s abrazivními způsoby odpovlakování, avšak laserové čištění přináší menší mechanické zatížení k čištěnému povrchu.³

3.4. Chemické odpovlakování

Jak bylo zjištěno, doposud žádný z mechanických způsobů odpovlakování nepřinesl výkonný a zároveň šetrný způsob odstraňování tvrdých povlaků. Buď byl zničen povrch nástroje částicemi abraziva, nebo nedošlo k úplnému odstranění povlaku na nástrojích se složitou geometrií. Alternativou k mechanickému odpovlakování je chemické a elektrochemické odpovlakování.

Chemickou cestou mohou být odstraněny různě tvrdé povlaky, zpravidla povlaky jež obsahují titan. Odpovlakování HSS v současnosti nepředstavuje žádný větší problém, proto není třeba se blíže zabývat touto problematikou. Odpovlakování slinutých karbidů, nebo jiných materiálů obsahující kobalt jako pojivovou fázi představuje v současné době chemický oříšek. Samotné tvrdé karbidy odolávají celkem dobře působení chemikálií, ale kobaltové pojivo které spojuje jednotlivá zrna tvrdých karbidů je napadáno a vyplavováno ze substrátu nástroje. To má vliv na zhoršení mechanických vlastností nástroje, neboť při absenci kobaltu ztrácí samotná zrna soudržnost a mezery mezi zrny mohou sloužit jako koncentrátoři napětí (obr. 19). Tímto je snížena ohybová pevnost

nástroje, je slabeno ostří, následný povlak vykazuje horší adhezi k substrátu a obrobena plocha má horší kvalitativní vlastnosti.

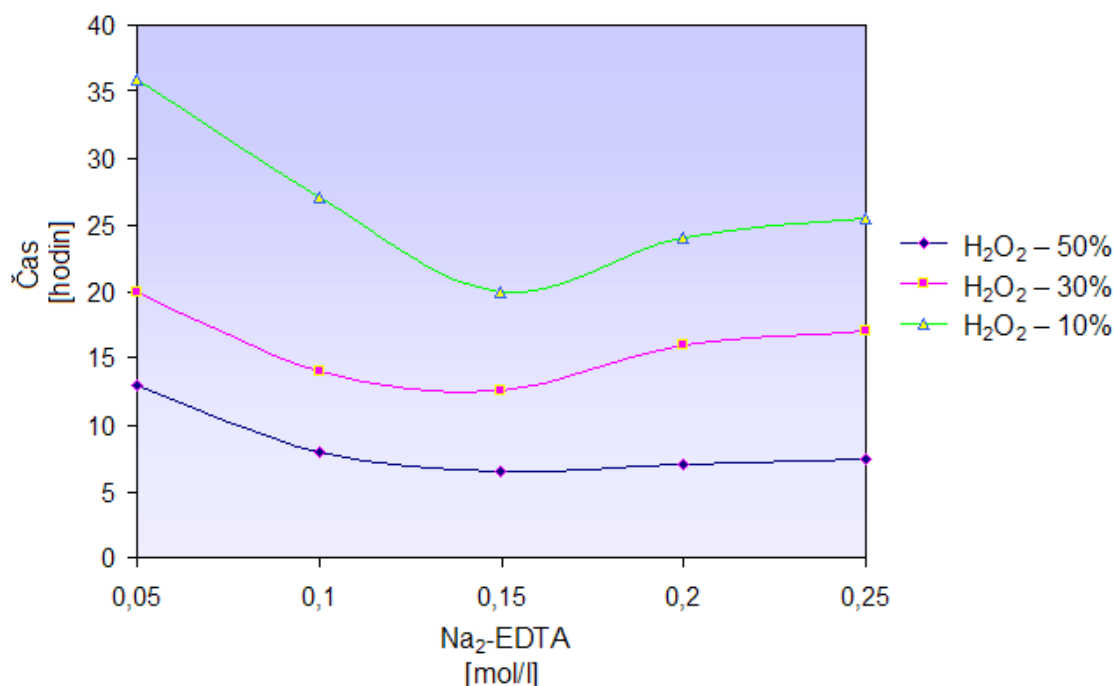


Obr. 19 Povrch slinutého karbidu – Zrno + pojivo ¹⁶

3.4.1. Příklady chemického odpovlakování HSS

Odpovlakování s peroxidem a Na₂-EDTA

U tohoto způsobu odpovlakování je kyselina dinatrium ethylendiamin-tetraoctová (Na₂-EDTA) jako komplexní látka a peroxid vodíku (H₂O₂) použit jako oxidační činidlo v koncentraci 30 - 50 %. S těmito chemikáliemi se dosahuje kompletního odpovlakování. Avšak čas odpovlakování je pro hospodárné využití příliš dlouhý. Také skladování a likvidace použité komplexní látky je velmi problematické. V této sérii pokusů byly dány různé koncentrace komplexního činidla a oxidačního činidla do závislosti na době odpovlakování (obr. 20). Pokusy probíhaly na za teploty 55 °C na vzorcích jež byly opatřeny 3 μm povlakem TiCN.

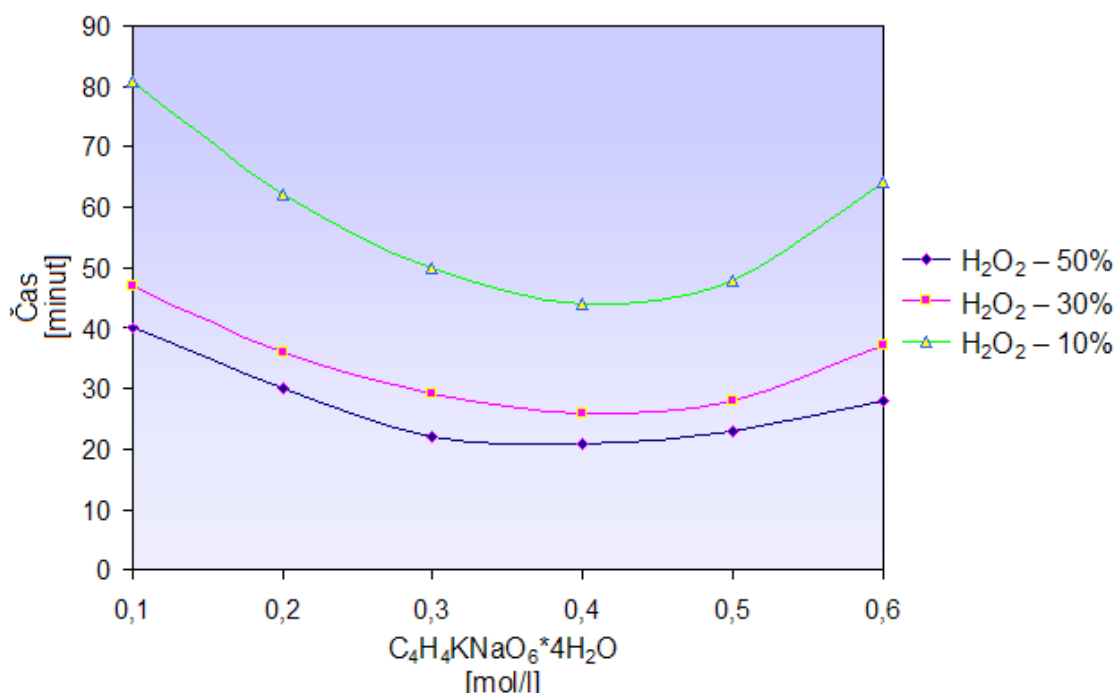


Obr. 20 Průběh odpovlakování s Na₂-EDTA + H₂O₂ za různých koncentrací ³

Z pokusů plyne, že nejrychlejšího odpovlakování bylo dosaženo při použití peroxidu vodíku o koncentraci 50 % a $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ v koncentraci 0,15 mol/l. Ačkoli povrch nástroje nebyl napaden, odpovlakování trvající 7 hodin není příliš hospodárné.³

Odpovlakování Kalium-Natrium-Tartrat-Tetrahydrátem a peroxidem vodíku

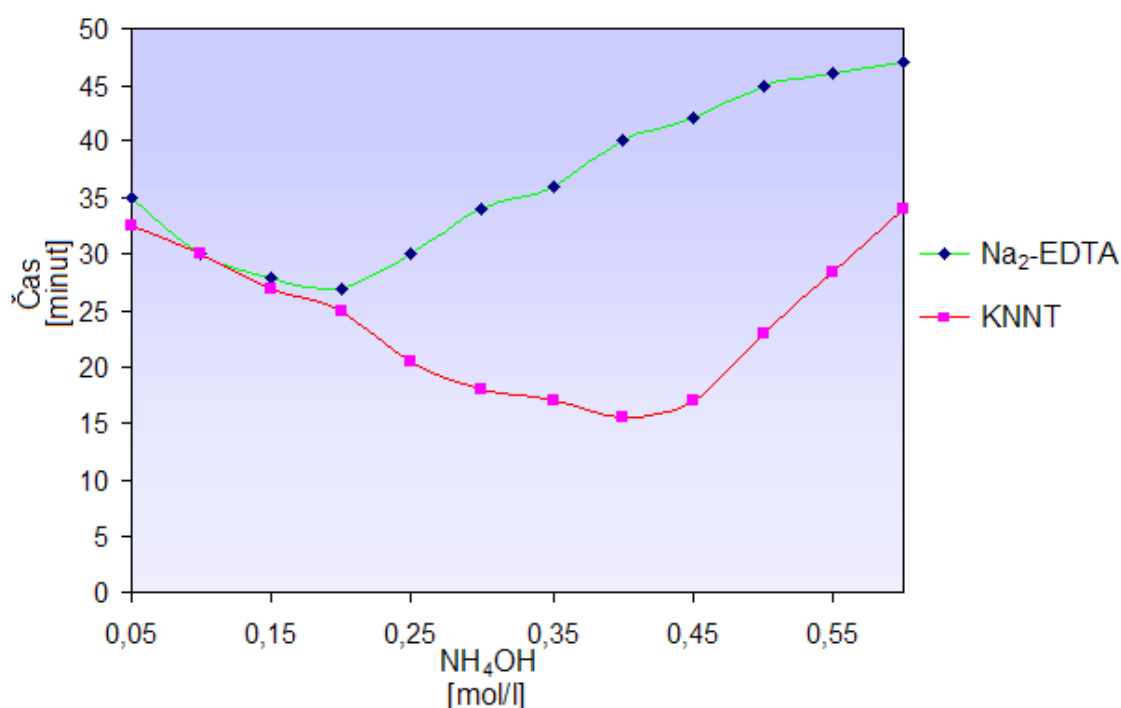
Z německého patentu DE 40 10 595 C1 je známo, že Kalium-Natrium-Tartrat-Tetrahydrát ($\text{C}_4\text{H}_4\text{KNaO}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) nebo Na-D-Glukanat jako komplexní látky a peroxid vodíku jako oxidační činidlo o koncentraci 30 % nebo vyšší, mohou odstraňovat TiN, TiCN a TiAlCN povlaky relativně v krátkém čase (obr. 21). Reakce odpovlakování je při použití KNNT rychlejší než u glukonátu, přesto mohou být časové rozdíly při použití vyšší koncentrace glukonátu smazány.



Obr. 21 Průběh odpovlakování s KNNT + H_2O_2 za různých koncentrací³

Z grafu je zřejmé, že odpovlakování při použití KNNT je mnohem rychlejší, než s $\text{Na}_2\text{-EDTA}$. K dokonalému odstranění povlaku o tloušťce 3 μm došlo při použití H_2O_2 v koncentraci 30 % a KNNT v koncentraci 0,1 mol/l za 46 minut, zatímco za těch samých podmínek trvalo odpovlakování s $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ 14 hodin.

Jak bylo zjištěno z předchozích pokusů, přidavkem hydroxidu amonného (NH_4OH) lze reakci výrazně urychlit. Pro účely pokusu byl použit $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ o koncentraci 0,15 mol/l a KNNT o koncentraci 0,4 mol/l. Peroxid vodíku měl koncentraci 30 % (obr. 22).



Obr. 22 Průběh odpovlakování $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ a KNNT za různých koncentrací NH_4OH ³

Z provedeného pokusu je zřejmé, že zejména u $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ je možno zkrátit dobu odpovlakování z hodin na minuty, a docílit vyšší hospodárnosti a efektivity tohoto způsobu.³

3.4.2 Základní legenda vlivů na rychlost a efektivitu odpovlakování

Rychlost a kvalita odpovlakování závisí na mnoha vlivech, jako je teplota za jaké reakce probíhá, koncentrace komplexních a oxidačních činitelů, nebo množství nástrojů v jedné dávce.

- Volba komplexotvorných látek: Chemická konstanta komplexotvorných látek je rozhodná pro chemickou rovnováhu při reakci a přitom také pro základ komplexu
- Pracovní teplota odpovlakování: Platí, že se zvyšující se teplotou se rychlost reakce zvyšuje, při rozdílu 10 °C se rychlost odpovlakování zrychlí o faktor 2,2.
- Koncentrace komplexního a oxidačního činitele: Platí, že koncentrace oxidačního činitele má také velký vliv na dobu odpovlakování, rychlost reakce neúměrně roste v závislosti na koncentraci oxidačního činitele. U komplexního činitele probíhá reakce nejrychleji při jisté „ideální“ koncentraci, která je různá u jednotlivých látek. Při nižší, resp. vyšší koncentraci než je „ideální“ probíhá reakce pomaleji, jak je vidno z grafů.
- Celková plocha jenž musí být odpovlakována: Zde hraje roli celková plocha nástrojů. Platí, že čím větší plocha je vystavena reakci, tím probíhá i samotná reakce rychleji.³

3.4.3 Výrobci chemických prostředků pro odpovlakování

V současnosti nabízejí mnozí výrobci, jež se specializují na problematiku odpovlakování chemikálie pro odpovlakování doslova „šité na míru“ pro konkrétní typy povlaků a substrátů. Nejznámější jsou Baku Chemie GmbH. a Borer Chemie.

Společnost Baku Chemie GmbH. nabízí mnoho produktů pro odpovlakování, nejznámějším z nich je Bakutrit 50. Tento produkt je určen pro dokonalé odpovlakování PVD a CVD povlaků na bázi Ti (TiN, TiC, TiCN, TiAlN) ze slinitých karbidů aniž by byl vyplaven kobalt. Bakutritem je možno odstranit i Al_2O_3 . Výsledný povrch je možno opět napovlakovat. Bakutrit je díky malému dávkování šetrný a protože je netoxický, není nebezpečný svému okolí.²

Švýcarská společnost Borer Chemie AG se zabývá výrobou zařízení, komponentů a chemikálií pro laboratoře, farmacie a průmysl. Do průmyslu dodává LCD-produkty, optiku, materiály pro použití v laboratoři a mimo jiné se zabývá odpovlakováním nástrojů pro obrábění.

Borer Chemie nabízí širokou škálu produktů pro odpovlakování nástrojů z HSS a SK. Tyto produkty dokážou odstranit povlaky na bázi titanu, chromu, zirkonu, ale i například DLC (tab. 1).

Tab. 1 Produkty společnosti Borer Chemie AG a jejich využití³¹

	TiN TiCN	TiAlN AlTiN TiAlN- Multivrstva	WC/C	DLC	Cr CrN	ZrN
SK K05 – K30 P25 – P40 Nástroje ze SK + Nástrojové oceli	deconex de-coat 100	deconex de-coat 110 deconex de-coat 100 (Multivrstvý TiAlN)	Vakuový stripping	Vakuový stripping	Doposud nenalezeno	deconex de-coat 110
HSS + jiné nástrojové oceli	deconex de-coat 200 deconex decoat 210	deconex de-coat 200 deconex de-coat 210	deconex de-coat 220	deconex de-coat 220	deconex de-coat 230	deconex de-coat 110

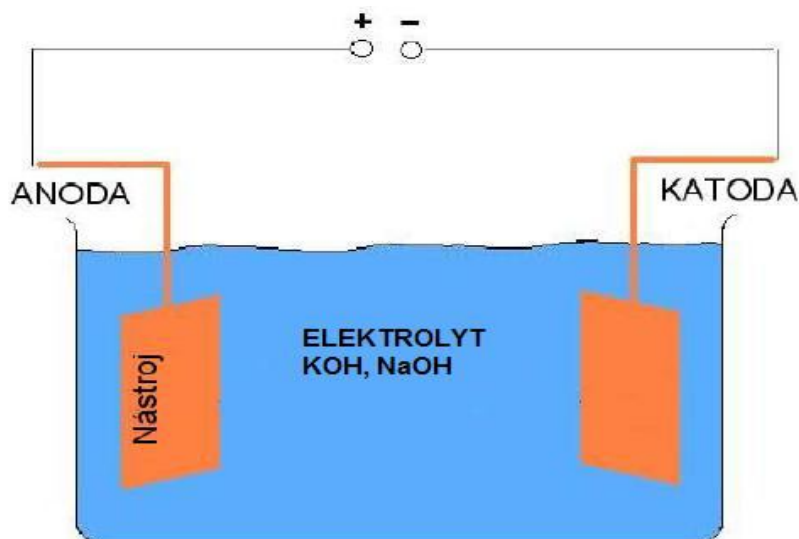
3.5 Elektrochemické odpovlakování

Elektrochemický stripping (anodický stripping, galvanostatický stripping) je metoda určena pro odpovlakování elektricky vodivých povlaků z řezných nástrojů a z různých napovlakovaných komponentů. Pomocí elektrochemického strippingu je možno odstranit jakékoliv vodivé povlaky, zejména povlaky které se doposud nedaří odstranit chemickou cestou. Mezi takové patří zejména Cr, CrN, AlCrN, tedy povlaky na bázi chromu.

V principu je elektrochemický stripping opačný proces než galvanické pokovování (obr. 23). Napovlakovaný předmět připojený na anodu je vložen společně s katodou do elektrolytu a připojen na zdroj stejnosměrného proudu.

Elektrolytem bývá nejčastěji roztok NaOH, ale používají se rovněž hydroxidy, KOH, HNO_3 , HF aj. Po připojení proudu se začnou z povlaku nástroje uvolňovat kladné ionty směrem k záporné elektrodě. Povlak se začne v elektrolytu rozpouštět.

Na rozdíl od chemického odpovlakování se reakce nezastaví samovolně, ale je třeba vystihnout správný okamžik kdy je povlak zcela odstraněn, a zdroj napětí odpojit. Tento okamžik se projeví změnou potenciálu vzhledem k referenční elektrodě v závislosti na době strippingu, kterou je možno měřit a sledovat. Důležitý faktorem u elektrochemického odpovlakování je použitá proudová hustota, která je dána podílem přivedeného proudu a ponořené plochy nástroje nebo jiného komponentu jenž je odpovlakován. Obecně platí, že čím vyšší je proudová hustota, tím rychlejší je reakce odpovlakování, ale rovněž potenciálový skok, který nám ukazuje konec reakce je nižší a hůře rozlišitelný. Tato horší rozlišitelnost konce procesu zároveň s vysokým tokem proudu může udělat metodu méně šetrnější a zvyšuje se tím i pravděpodobnost napadení a poškození substrátu.^{6, 16, 26}



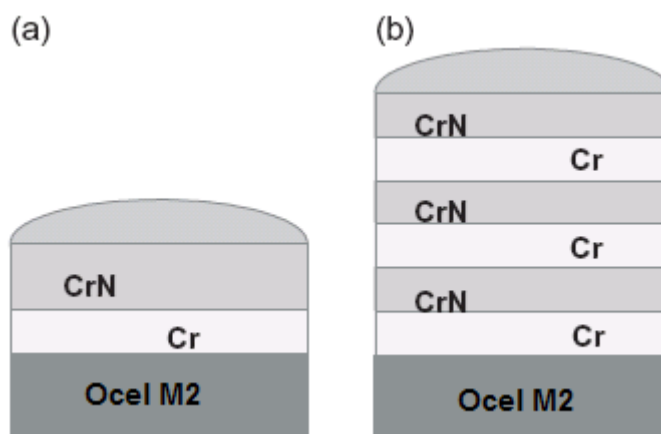
Obr. 23 Technologie elektrochemického odpovlakování¹⁶

3.5.1 Příklad elektrochemického odpovlakování

Terčíky o průměru 20mm a tloušťky 3 mm z rychlořezné oceli M2 (C 0,97 %, Si 0,2 %, Mn 0,2 %, Cr 4,11 %, W 6,3 %, V 1,8 %, Mo 4,9 %, a Fe) byly napovlakovány CrN, technologií PVD napařování s přídavnou ionizací. Povlaky byly aplikovány dvěma různými způsoby. V první skupině vzorků byla nanесena jedna vrstva CrN o tloušťce mezi 1.4 – 1.7 μm a Cr mezivrstva o přibližné tloušťce 0,1 μm mezi nitridem a substrátem. Druhá skupina vzorků obsahovala multivrstvé povlaky o celkové tloušťce mezi 5 – 6 μm , kde byla každá ze tří CrN vrstev oddělena mezivrstvou Cr o tloušťce 0.1 μm (obr. 24).

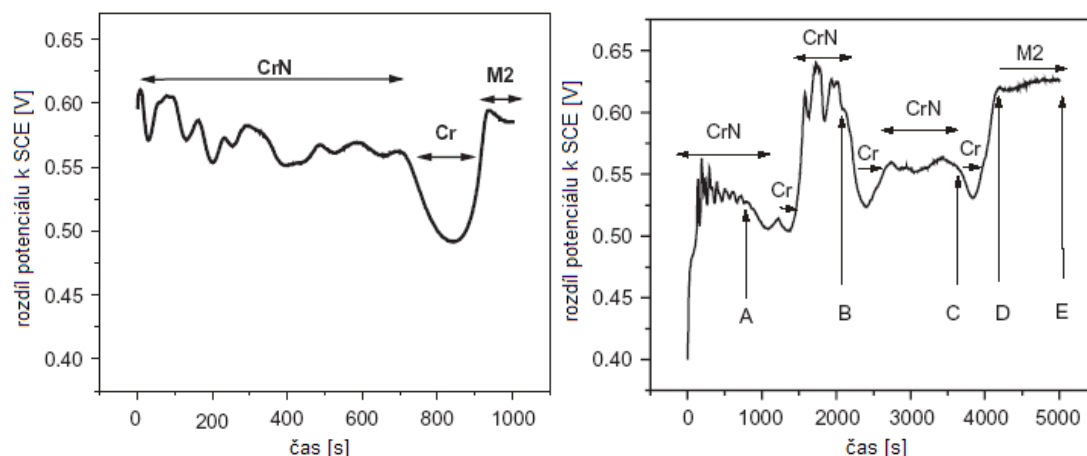
Zařízení, jenž bylo použito pro odpovlakování obsahovalo 3 konvenční samostatné elektrody. Elektrodu z nasyceného chloridu rtuťnatého (SCE – saturated calomel electrode), platinovou elektrodu a elektrodu z testovaných vzorků. Plocha CrN vzorků, vystavená reakci, měla 0,22 – 0,29 cm^2 . Chemické

složení alkalicko – oxidického roztoku bylo dodáno společností Tecvac. Složení tohoto roztoku je chráněno obchodním tajemstvím.



Obr. 24 Povlaky na vzorcích, a) monovrstva b) multivrstva ⁵

První testy proběhly na vzorcích s jednou CrN vrstvou. Připojení proudu 2 mA na vzorky o ploše 0,22 – 0,29 cm² odpovídá proudová hustota 7 – 9 mA/cm². Změny potenciálu zaznamenané během odpovlakování CrN jsou znázorněny na grafech (obr. 25). První odstraňování povlaku je zřetelné na hodnotě 0,58 V/SCE, to je spojeno s odstraňováním vnější vrstvy, následovně poklesem potenciálu na 0,52 V/SCE, což je spojeno s odstraňováním povlaku Cr. Nakonec potenciál vzroste na 0,6 V/SCE, to odpovídá dosažení M2 substrátu.

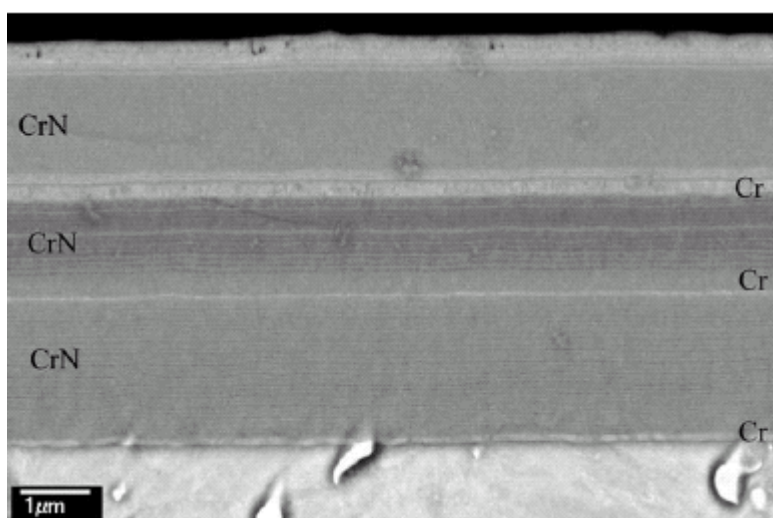


Obr. 25 Průběh rozdílu potenciálů při odpovlakování monovrstvy a multivrstvy ⁵

Multivrstvé vzorky byly rovněž podrobeny zkoušce za stejných podmínek. Zaznamenaný pokles potenciálu znázorňuje odpovlakování vrstvy Cr. V okamžiku kdy začne potenciál strmě růst, je vrstva Cr odstraněna a začíná se rozpouštět CrN vrstva. První pokles potenciálu nastává v čase 1250 s, následuje druhým poklesem v čase 2300 s, a poslední, třetí je v čase 3800 s. Nicméně naměřený potenciál odpovídající rozkladu každé vrstvy není vždy stejný, důvodem může být rozdílné složení v každé vrstvě; možná souvislost

s existencí nitridů s rozdílnou stechiometrií, nebo přítomností oxinitridů chromu a chromátů na povrchu jenž vznikly při procesu povlakování.

Jak je vidno z grafu, je doba odstraňování jednotlivých vrstev různá. Při zkoumání výbrusu plochy byla zjištěna nehomogenita tloušťky povlaku, která při porovnání tloušťky každého povlaku a doby odpovlakování každé vrstvy navzájem koresponduje (obr. 26). Zpětně je díky tomu možné spočítat tloušťku vrstvy z doby která byla potřeba na její odstranění.



Obr. 26 Řez napovlakovaným multivrstvým vzorkem ⁵

K odstranění povlaku přispívá kromě samotného anodického rozkladu i odlupování povlaku ve formě drobných šupinek. Tento efekt vzniká zejména u multivrstvých povlaků, např. CrN – Cr, kde po narušení vrstvy CrN se začne snadněji rozkládat méně stabilní vrstva Cr, jenž leží právě pod CrN. Šupinky po odloupenutí se již dále nerozkládají, protože ztratí kontakt s anodou a rozklad přestane probíhat.^{6, 26} Na podobném principu funguje metoda elektrochemické pasivace

3.5.2. Elektrochemická pasivace

Od dubna 1996 vešla byla zveřejněna metoda elektrolytické pasivace pod označením No. 38447 pro odstraňování povlaků aplikovaných na nástroje. U této metody se tvoří oxidy wolframu na rozmezí mezi substrátem a povlakem. Tato pasivace karbidu wolframu je umožněna za pomoci anodické polarizace nástroje ve vhodném elektrolytu. Díky transformaci karbidu wolframu na oxid wolframu, ztratí tvrdý povlak adhezi k substrátu a odpadne.

Jako elektrolyt je nejčastěji zvoleno kyselé médium, které má pH stupeň v rozmezí 2 až 5. Elektrolytický roztok, jenž je cenově příznivý a výhodný s ohledem na životní prostředí a bezpečné složení se skládá z acetických kyselin a vodivé soli, nejlépe z nitrátové soli. Proudová hustota se udržuje v rozmezí 0,01–0,1 mA/cm². Pasivovaná vrstva oxidu wolframu je ze substrátu odstraněna v následné operaci úpravy povrchu pískováním, kartáčováním nebo leštěním.

Jak je v současnosti známo, navržená metoda je použitelná pro odstranění všech elektricky vodivých tvrdých materiálů, které jsou běžně používány. Jsou to nitridové povlaky, karbidové povlaky, karbonitridy kovů, kovové slitiny jako TiAlN, TiAlNC, WC, WCN atd. rovněž chromové povlaky jako Cr, CrN, CrC, CrNC, kombinace těchto tvrdých vrstev nebo multivrstvé povlaky.

Podmínky, které musejí být zvoleny při odpovlakování jsou extrémně kritické. Pokud jsou nastaveny špatné parametry, nemusí být vlastní vrstva povlaku odstraněna, nebo se nástroj může nenávratně poškodit.³¹

3.6. Vlastní experiment

Cílem tohoto experimentu bylo zjištění, jaký vliv mají různé metody odpovlakování na substrát ze slinutého karbidu. Vyzkoušeny byly 3 různé metody, metoda chemického odpovlakování SK, metoda chemického odpovlakování HSS a metoda elektrochemického odpovlakování.

3.6.1. Příprava vzorků

Vzorky byly nařezány ze stopkových nástrojů pomocí diamantových kotoučů ve firmě Ham-final. Pro účely pokusu bylo vytvořeno celkem 8 vzorků. 4 ze slinutého karbidu DK 460 UF (10 % kobaltu + 90 % WC, K10, HV30 – 1620, ohybová pevnost 3700 N/mm², velikost zrna < 0,5 μm) a 4 vzorky z cermetu TCN 54 (P15/P20, HV30 – 1650, pevnost v ohybu 1900 N/mm², velikost zrna < 2,5 μm) ve tvaru terčíků o tloušťce 5 mm.

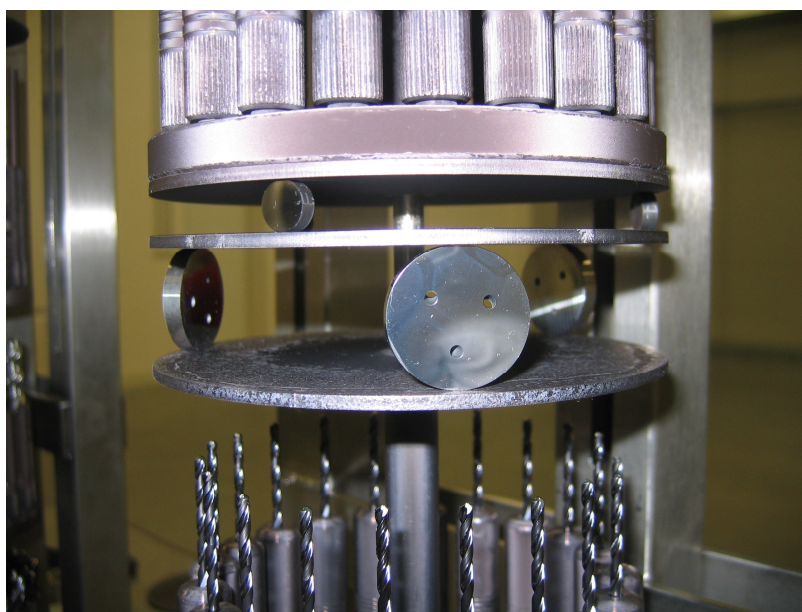
Terčíky byly zalisovány v dentakrylové pryskyřici do válečků o ø30mm na zařízení Stuers Labopres – 3. Tlak slinování byl 20 kN za teploty 180 °C. Doba ohřevu byla nastavena na 7 minut a doba ochlazování zalisovaného vzorku na 3 minuty. Díky vysoké tvrdosti vzorků nebylo možno vybrousit a vyleštit plochu v laboratoři pro přípravu klasických metalografických výbrusu, kde je používán korund jako abrazivo pro hrubování plochy, ale bylo třeba tyto vzorky vybrousit a vyleštit v laboratoři pro přípravu keramických vzorků, kde jsou používány diamantové roztoky a pasty.

Tab. 2 Podmínky při broušení a leštění vzorků

	Operace	Brousicí médium	Otáčky kotouče [min ⁻¹]	Doba broušení [min]	Přítlačná síla [N]
1.	Hrubování	Diamantový kotouč Zrnitost 120	300	3	30
2.	Hrubování	Diamantová pasta Velikost zrna 9 μm	150	5	30
3.	Leštění	Diamantová pasta Velikost zrna 3 μm	150	5	20
4.	Leštění	Diamantová pasta Velikost zrna 1 μm	150	10	15

Broušení plochy bylo prováděno na stroji Struers TegraPol – 25. Na tomto stroji je možno náraz brousit až 6 vzorků (tab. 2). Vzájemný pohyb vzorků a brousícího kotouče byl nesousledný. Po finálním vyleštění získaly terčíky zrcadlově lesklou plochu.

Poté, co byly terčíky vyjmuty z dentakrylové pryskyřice a očištěny ethanolem, byly 3 cermetové a 3 vzorky ze SK vloženy do produkční šarže (obr. 27). Na vzorky byl metodou magnetronového rozprašování nanesen povlak TiAlN – ALOX SN². Z testu výbrusem kulového vrchlíku (test kalotou) bylo zjištěno, že povlak má tloušťku 4 μm . Poté byly vzorky pomocí vyjiskřovacího zařízení opatřeny na zadní straně čísly 1, 2, 3, pro jejich budoucí identifikaci.



Obr. 27 Vzorky v produkční šarži

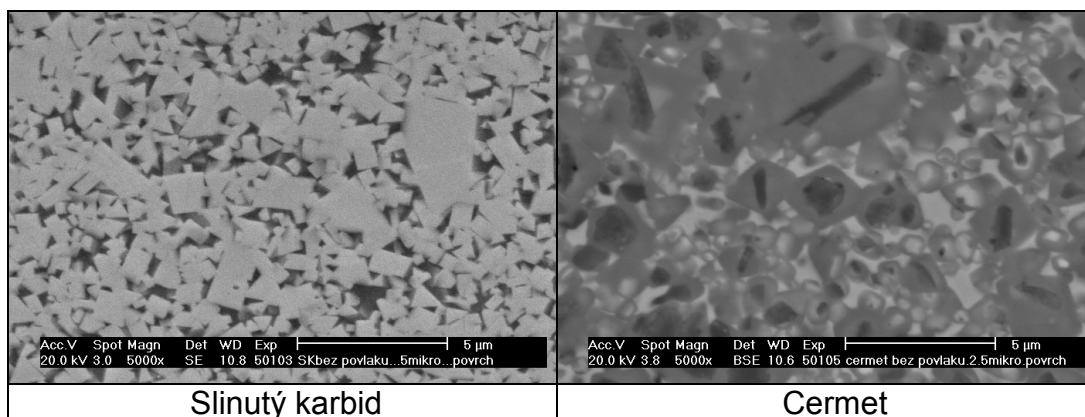
3.6.2. Nenapovlakované vzorky

Povrch nenapovlakovaných vzorků byl zkoumán elektronovým mikroskopem jenž se nachází na fakultě strojního inženýrství. Světelným mikroskopem fy. CemeCon nebylo možno přiblížit povrch vzorku až na úroveň zrn. Objektem zájmu byl zejména povrch substrátu a přítomnost pojiva mezi jednotlivými zrn.

Protože byl slinutý karbid zařazen výrobcem do třídy K10, bylo zřejmé, že hlavními a jedinými složkami substrátu bude karbid wolframu (jako tvrdá fáze) a kobalt (jako pojivová fáze). Tento druh slinutého karbidu je určen pro obrábění materiálů s drobnou třískou. Karbid wolframu ztrácí svou tvrdost se vzrůstající teplotou rychleji než jiné druhy karbidů, a tudíž není vhodné jej nasadit na obrábění kovů jenž tvoří dlouhou třísku, která více tepelně zatíží nástroj.

Z pořízených snímků lze zpozorovat ostrohranná zrna karbidu wolframu s rozměry v rozmezí 0,3 – 3 μm (ačkoliv výrobce udává maximální velikost zrna 0,5 μm). Na karbidech je možno spatřit rýhy vzniklé zřejmě při broušení di-

amantovou pastou. Kobaltové pojivo je znázorněno tmavou barvou mezi jednotlivými zrny (obr. 27).



Obr. 27 Povrch nenapovlakovaných vzorků zvětšený 5000x

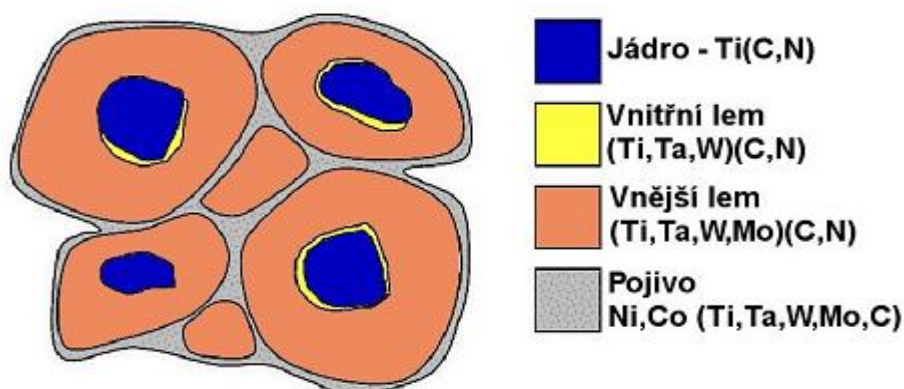
Na vzorcích byla provedena i plošná analýza pro určení druhu a objemového množství jednotlivých prvků v substrátu obsažených. Při plošné analýze je substrát testován od povrchu až do hloubky 5 µm na ploše která je předem určena. Povrchová analýza dokonce dokáže určit druh a objemové množství prvků v jednotlivých fázích, které byly dopředu bodově označeny, tzv.bodová analýza.

Plošná analýza u vzorku ze slinutého karbidu při zvětšení 1000x odhalila přítomnost kobaltu a wolframu. Kobalt v množství 9,68 hm% a wolfram v množství 90,32 hm%. Tímto se jen potvrdilo tvrzení výrobce, který udává obsah kobaltu 10 %.

Cermetový vzorek vykazoval zcela odlišnou strukturu než slinutý karbid. Zrna tvrdé fáze byla na rozdíl od slinutého karbidu různě zbarvená a zaoblená. Zrno cermetu je tvořeno jádrem z Ti (C, N), které je obklopeno vnitřní a vnější slupkou vytvořenou z karbidů a nitridů Ti, W, Ta, Mo. Tato zrna jsou spojena Ni, Co pojivem (obr. 28).

Plošná analýza cermetu nám dala představu o složení substrátu. Výrobce udává obsah pojivové fáze 14,1 %. Z analýzy plyne, že obsah kobaltu činí 8,8 hm% a obsah niklu 5,5 hm%. To dává dohromady 14,3 hm%. Složení substrátu tedy odpovídá údajům výrobce. Pevná fáze je tvořena Ti (53,32 %), Mo(17,43 %), W(14,63 %) a zřejmě i Ta, který ale nebyl zanalyzován. Plošná analýza a detailní fotografie se nachází v příloze 1.

Dále byla provedena bodová analýza pojiva, jádra a obalu zrna. Jádro bylo složeno převážně z Ti a C. V obalu jádra byl Ti nadále dominantním prvkem, ale podíl ostatních prvků byl vyšší než u samotného jádra. Bodová analýza pojivové složky zjistila převahu Co a Ni nad ostatními prvky. Nicméně bodová analýza pomocí elektronového mikroskopu může výsledky zkreslovat, protože hloubka analýzy sahá 5 µm pod povrch vzorku. Tudíž při analýze např. pojivové fáze jsou částečně zanalyzována i zrna ležící pod pojivem do hloubky 5 µm od povrchu. Proto je ve výsledcích zaznamenána i přítomnost prvků jako Ti, W a Mo, ačkoliv pojivo tyto prvky neobsahuje.

Obr. 28 Schéma struktury cermetu ²⁰

3.6.3. Odstranění povlaku metodou chemického odpovlakování slinutých karbidů

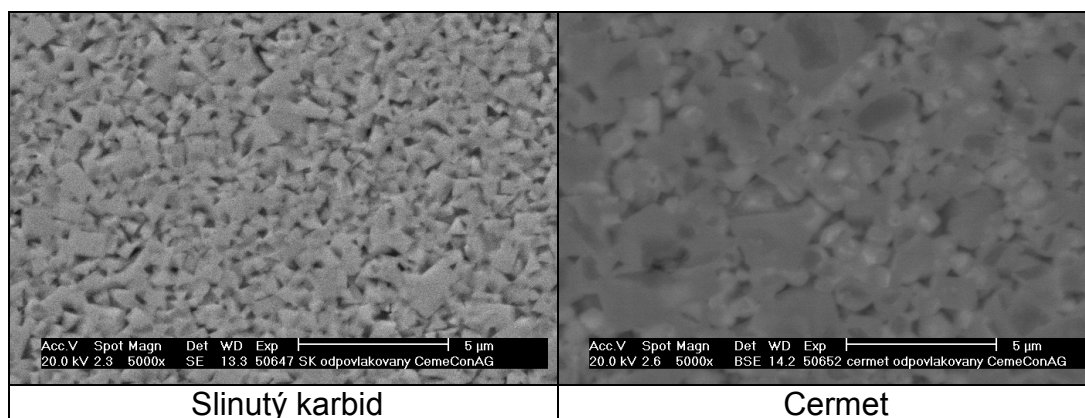
Tyto vzorky byly připraveny na analýzu metody pro odstraňování povlaků na bázi Ti ze slinutých karbidů, která byla vyvinuta a patentována německou spol. CemeCon AG. Metoda je založena na principu chemického odstraňování povlaku. Předností této metody by mělo být odstranění naneseného povlaku ze slinutého karbidu, aniž by byla napadena pojivová fáze. Vyleptání pojivové fáze je důvod, proč je odpovlakování SK na rozdíl od HSS tak problematické. Zkoumané vzorky byly odeslány na odpovlakování do společnosti CemeCon AG. sídlící ve Würselenu v Německu.

Odpovlakované vzorky vykazovaly různý stupeň odstranění povlaku. Leštěná plocha vzorku ze slinutého karbidu byla hladká a lesklá s lehce modrým odstínem. Obrácená strana (neleštěná) byla svým zabarvením a leskem k nerozeznání podobná vzorku předtím, než byl napovlakován. Na základě úsudku, že leštěná strana byla natočena směrem k terčům v povlakovacím zařízení a tudíž na ni byla nanесena silnější vrstva povlaku, lze dospět k závěru, že modré zabarvení na leštěné straně je způsobeno zbytkem nerozpuštěného povlaku. Obrácená strana byla díky menší tloušťce povlaku odpovlakována dokonale. Na povrchu vzorku je možno spatřit zbytky starého povlaku, který překrýval drátek za který byl terč v povlakovací lázni uchycen. Díky špatné cirkulaci odpovlakovacího roztoku okolo drátku nebyl povlak v těchto místech zcela odstraněn.

Povlak na cermetovém vzorku byl odstraněn jen v blízkosti míst, za která byl vzorek upnut. V těchto místech byl díky stínovému efektu a potenciálu upínače odebírán povlakovací materiál, který namísto toho, aby se zachytil na vzorku, skončil na upínači. Proto měl povlak v těchto místech menší tloušťku. Odpovlakovaná místa tvořila dva protilehlé půlměsíce. Důvodem toho, že povlak byl špatně odstraněn byla zřejmě malá reakční plocha vzorku, a tím i pomalejší reakce.

Odpovlakované vzorky byly rovněž podrobeny analýze na elektronovém mikroskopu. Slinutý karbid na první pohled nevykazoval žádné poškození. Zrna karbidů stejně jako kobaltové pojivo zůstaly nepoškozené (obr. 29). Při vizuálním porovnání plochy odpovlakovaného a doposud nenapovlakovaného

vzorku nelze spatřit téměř žádný výrazný rozdíl ve struktuře obou substrátů. U odpovlakovaného vzorku se jen povrch a zrna jeví více prostorově. Pozorování byla podrobena i neleštěná plocha na obrácené straně vzorku. Díky hrubému povrchu s rýhami po řezání diamantovým kotoučem bylo téměř nemožné spatřit jednotlivá zrna substrátu. Avšak plošná analýza ukázala rozdíly v množství kobaltu v pojivové fázi. Zatímco nenapovlakovaný vzorek obsahoval 9,68 hm% kobaltu a 90,32 hm% wolframu, na leštěné straně odpovlakovaného vzorku se nacházelo 7,16 hm% kobaltu a 92,84 hm% wolframu. Na neleštěné ploše, která byla vystavena delší dobu odpovlakovací lázni díky menší tloušťce povlaku zůstalo kobaltu ještě méně, konkrétně 5,13 hm% kobaltu a 94,87 hm% wolframu.



Obr. 29 Povrch vzorků odpovlakovaných metodou chemického odpovlakování slinutých karbidů zvětšený 5000x

Plocha cermetového vzorku rovněž nevykazovala výrazné poškození zrn, zde však již byla znatelná absence pojiva. Mezery mezi jednotlivými zrny byly zřetelné. Mírné vyplavení pojiva bylo potvrzeno na plošné analýze kde z původních 14,2 hm% pojivové Co/Ni fáze zůstalo přítomno 6,07 hm% kobaltu a 4,09 hm% niklu, celkem tedy 10,18 hm% pojiva. Plošná analýza a detailní fotografie se nachází v příloze 2.

Ačkoliv na základě výsledků plošné analýzy došlo k mírnému snížení obsahu pojiva v povrchových vrstvách obou sledovaných vzorků, lze ze snímků plochy z hora a v řezu, pořízených elektronovým mikroskopem, a z lesklé a hladké plochy usoudit, že k žádnému poškození substrátu nedošlo. Pojivo bylo zřejmě vyplaveno jen na leštěné ploše, a to maximálně do hloubky několika desetin μm . Na snímcích řezu rozhraní povlak - substrát je možno spatřit reliéf povrchu způsobený nepřítomností kobaltu, který kopíruje nově nanesený povlak. Ze snímků je zřejmé, že substrát nebyl do hloubky nijak poškozen.

Po strippingu nástrojů ze SK dochází k přípravným operacím před novým povlakováním, kdy je povrch podroben např. mikro pískování pro zaoblení ostří. Přitom je povrch substrátu ovlivněn abrazivem a zrna karbidů, která ztratila soudržnost k substrátu jsou odtryskána. Proto je malé odleptání kobaltu v řádu desetin μm zcela nepodstatný problém, protože mechanické ovlivnění povrchu např. při mokřím pískování zasahuje do větší hloubky.

3.6.4. Odstranění povlaku metodou chemického odpovlakování HSS

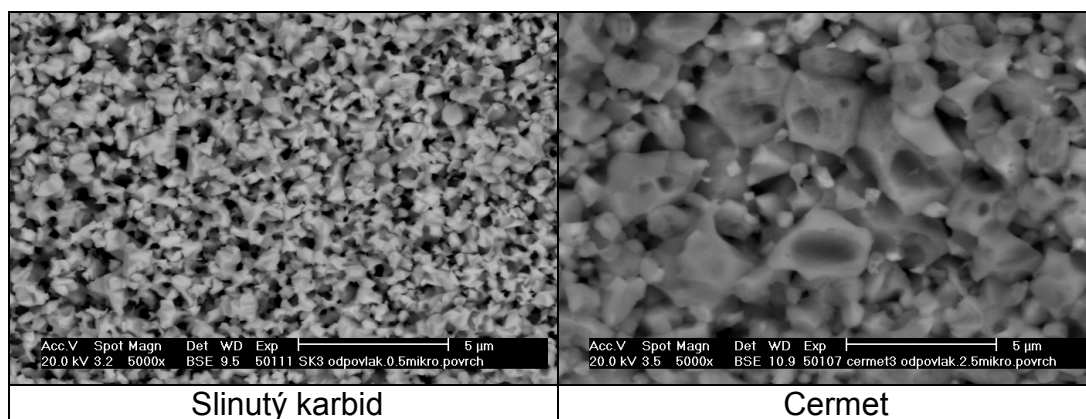
Tyto vzorky byly připraveny pro odpovlakování klasickou chemickou metodou, která je určena pro odstraňování povlaků z HSS nástrojů. Účelem tohoto testu bylo ozřejmění otázky, proč nemohou být SK (a cermety) odpovlakovány stejným způsobem jako HSS, a do jaké míry je vyplaveno kobaltové (a niklové) pojivo. Odpovlakování bylo prováděno společně s odvalovacími frézami v odpovlakovacím koši za podmínek popsanych v kapitole 2.4.2.

Vzorky po vytažení, opláchnutí a vysušení vzduchem vykazovaly značné rozdíly na pohled i na omak v porovnání se stavem před odstraněním povlaku. Povrch byl zčernalý a zdrsňělý. Vzorek evidentně vykazoval poškození. Pomocí testu kalotou, který se používá pro stanovení tloušťky povlaku bylo zjištěno, že poškození vzorku (vyplavení pojivové fáze) je v hloubce 15 μm od povrchu stále znatelné.

Míra poškození substrátu byla ovlivněna mnoha faktory:

- Tloušťkou povlaku jenž byl nanesen na substrát – čím mohutnější vrstva, tím kratší dobu byl substrát vystaven působení reakce a o to bylo poškození menší
- Síla reakce – je ovlivněna koncentrací a teplotou reaktantu. Čím bouřlivěji reakce probíhá, tím intenzivněji je vyleptávána pojivová fáze
- Dobou působení reaktantu na substrát – souvisí s časem, jenž je potřeba k odpovlakování odvalovacích fréz ve společné dávce se vzorkem. Pokud byl ze vzorku odstraněn povlak dříve, než z odvalovací frézy, byl substrát vystaven reaktantu tak dlouho, dokud nebyly frézy vytaženy.

Odpovlakované vzorky byly rovněž podrobeny analýze na elektronovém mikroskopu. U slinutého karbidu zcela chybělo pojivo, a tak bylo možné téměř prostorově pozorovat skelet substrátu bez pojiva, mezery mezi zrny, jejich tvar a velikost. Povrchová analýza přinesla očekávané výsledky, a sice úplnou absenci kobaltového pojiva. Naměřený obsah wolframu byl 99,74 hm%. Kobaltu bylo sice naměřeno 0,26 hm%, ale vzhledem k chybě měření 52,54 nelze obsah Co považovat za správný (obr. 30).



Obr. 30 Povrch vzorků odpovlakovaných metodou chemického odpovlakování HSS zvětšený 5000x

Podobná situace byla i u cermetu. Povrch cermetu při absenci pojiva tvořila pouze zaoblená zrna tvrdá fáze. Z povrchové analýzy rovněž plyne, že kobalt a nikl byl z povrchu vyplaven. V testu je sice zastoupen Co (1,1 hm%) a Ni (0,75 hm%), ale vzhledem k vysoké chybě u těchto zkoumaných prvků (18,44 a 27,72) jsou tyto výsledky nepoužitelné. Zajímavé ovšem je, že i po odpovlakování u těchto nepřesných výsledků zůstává poměr naměřených složek pojiva (Co/Ni) ve stejném poměru jako u vzorku který neprošel procesem odpovlakování. Plošná analýza a detailní fotografie se nachází v příloze 3.

3.6.5. Odstranění povlaku metodou elektrochemického odpovlakování

U těchto vzorků bylo snahou odstranit povlak TiAlN za pomoci elektrochemického odpovlakování. Pokus byl proveden na zařízení odstraňující AlCrN a CrN povlaky z HSS odvalovacích fréz. Cílem tohoto pokusu bylo posouzení vlivu elektrochemického odpovlakování na povlak a na substrát.

Odpovlakování probíhalo v 10 % roztoku NaOH při proudové hustotě 0,23 mA/mm². Vzorky byly našaržovány do odpovlakovacího zařízení spolu s odvalovací frézou. Odpovlakování probíhalo 20 minut. Po vytažení vzorků z elektrolytu bylo provedeno pozorování povrchu pod optickým mikroskopem. Avšak žádná výrazná změna povlaku na vyleštěné ploše zpozorována nebyla. Podobného výsledku bylo dosaženo i po dalších 15 minutách odpovlakování za stejných podmínek. Na ploše se objevily pouze malé krátery, které ukazují jen mírnou aktivitu na povlaku.

Povlak z TiAlN se za podmínek, jenž jsou používány pro odpovlakování AlCrN odstranit nepodařilo. Leštěná plocha zůstala i nadále lesklá a hladká. Tímto nemohl být posouzen ani vliv elektrochemického odpovlakování na substrát. Proto byl připraven další vzorek ve tvaru terče, tentokrát ze slinutého karbidu MG12 od společnosti Ceratizit (6 % Co, třída K05 – K10, velikost zrna 0,5 – 0,8 μm), který byl z poloviny napovlakován, druhá polovina zůstala bez povlaku. Na takovém vzorku již mohl být testován jak substrát, tak i povlak. Spolu s ním byl do elektrolytu vložen a na elektrodu připojen váleček ze slinutého karbidu. Vzorky byly připojeny k zařízení bez odvalovací frézy. Substrát byl testován nejprve při proudové hustotě 0,23 mA/mm², tedy za stejných podmínek jako původně. Za 30 minut byly vzorky vytaženy. Povlak TiAlN byl opět nepoškozen. Substrát na obou vzorcích změnil svou barvu ze zrcadlově lesklé na světle šedou.

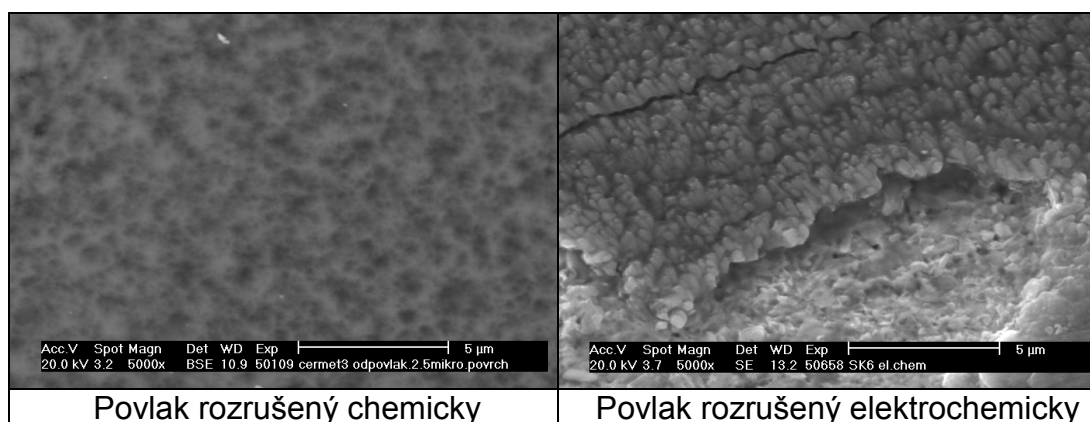
Váleček byl poté umístěn do zařízení na mokré pískování, aby byla zjištěna kvalita povrchu nástroje při standardních postupech přípravy nástroje na povlakování. Váleček měl po opískování hladký, matně lesklý povrch, podobně jako jiné nástroje ze slinutého karbidu, které nebyly podrobeny elektrochemickému odpovlakování.

Vzorek ve tvaru terče byl otestován ještě jednou, tentokrát za extrémních podmínek, aby bylo zjištěno, jestli se podaří povlak ze substrátu odstranit, a zdali bude substrát více poškozen. Na terč byl přiveden proud 8A, což se rovnalo proudové hustotě 8,5 mA/mm². Po uplynutí 30 minut byl vzorek vytažen, opláchnut a vysušen. Povlak změnil barvu na tmavě fialovou, téměř černou. Substrát se jevil stále stejně šedý.

Elektronový mikroskop přinesl mnohem zajímavější výsledky. Původní karbidové a cermetové vzorky testovány nebyly. Povlak se nepodařilo odstranit, tím pádem nebylo co zkoumat. Proto byl zkoumán terč ze slinutého karbidu MG12, který byl napovlakován z jedné poloviny. Povrch substrátu vypadal přesně opačně, než u vzorku kde byla použita metoda chemického odpovlakování HSS. Namísto vyplaveného kobaltu a skeletu z karbidových zrn se povrch jevil, jako by pojivová fáze byla zachována a z ní byla vytrhána zrna karbidu. Tuto domněnku potvrdila plošná analýza prvků. Terč měl obsahovat 6 hm% kobaltu. Výsledky analýzy přinesly zcela odlišné výsledky. Povrch substrátu obsahoval 11,02 hm% kobaltu a 88,98 hm% wolframu. Plošná analýza a detailní fotografie se nachází v příloze 4.

3.6.6. Porovnání principu odstranění povlaků

Při odpovlakování chemickou cestou (metoda odpovlakování HSS a metoda odpovlakování slinutých karbidů) dochází, jak je patrné ze snímků pořízených elektronovým a světelným mikroskopem k postupnému a rovnoměrnému chemickému rozpouštění povlaku. Povlak se vlivem reakce s odpovlakovacím roztokem rozpouští a vytváří s reaktantem nové chemické sloučeniny (obr. 31).



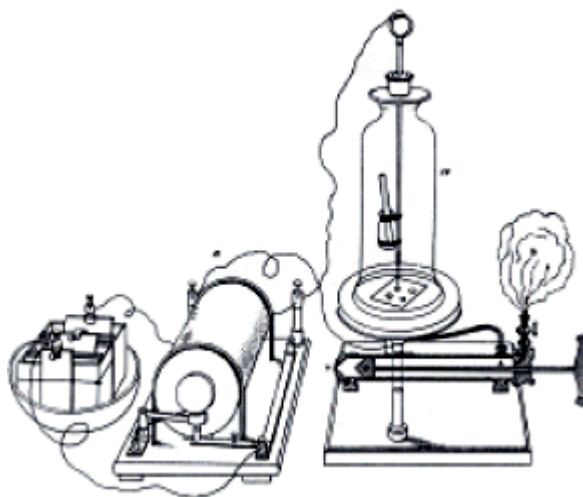
Obr. 31 Chemicky a elektrochemicky rozrušené povlaky

Při elektrochemickém odpovlakování dochází také k rozpouštění povlaku. Avšak z pořízených snímků je zřejmé, že nanokompozitní povlak, jenž je složený z více fází, tvrdé a pojivové, podobně jako slinutý karbid, se rozpouští nerovnoměrně. Al pojivo se rozpustilo mnohem ochotněji než pevná fáze povlaku. Dalším činitelem při elektrochemickém odstraňování povlaku je ztráta soudržnosti povlaku se substrátem. Plošná analýza a detailní fotografie se nachází v příloze 5.

4. Nanesení nových povlaků a vyhodnocení vlastností vybraných rezných nástrojů

4.1. Historie PVD povlakování

První vakuová pumpa pístového typu byla vynalezena r. 1640 Otto van Guerickem pro odčerpávání vody z dolů. Nicméně první osobou která využila vakuovou pumpu pro vytvoření doutnavého výboje v trubce ve které bylo vakuum byl M. Faraday roku 1838, který použil mosaznou elektrodu a vakuum přibližně o 2 torrech. Roku 1852 W.R. Grove byl prvním, co studoval jev, dnes známý jako rozprašování, ačkoli sledoval efekt při studiu doutnavého výboje. Grove použil špičku drátu jako zdroj povlaku a rozprašoval jej na vysoce vyleštěný stříbrný povrch, ležící blízko u drátu při tlaku okolo 0,5 torr. Zaznamenal povlakování stříbrného povrchu když byl zapojen jako anoda a drát jako katoda v elektrickém obvodu (obr. 32). Roku 1858 profesor A.W. Wright z univerzity v Yale vydal článek v „Americkém žurnálu vědy a umění“ o povlakovacím zařízení pro vytváření zrcadel. Tento druh povlakování je více založen na obloukovém odpařování než rozprašování, jak US patentový úřad citoval jeho práci, když podnětný T. Edison použil patent vakuového povlakování pro nanášení povlaků na voskový válec fonografů před následným galvanickým pokovováním. Edison úspěšně namítal, že jeho objevem byl nepřetržitý výboj, zatímco Wrightův proces byl pulsní výboj. Edison mohl proto říct, že byl prvním člověkem, co udělal první komerční využití rozprašování uvnitř válce.



Obr. 32 Groveovo zařízení pro rozprašování ¹⁸

V pozdních 30. letech 20. stol. objevil Penning „elektronovou past“ pro spoutání elektronů užitím kombinace elektrického a magnetického pole. Kombinace elektrického a magnetického pole zvyšuje ionizaci plasma blízko povrchu a byla pojmenována jako „Penningův výboj“ po svém objeviteli. Penningův objev dal základ magnetronu. Tato kombinace elektrického a magnetického pole umožnila rozprašování za nižších tlaků a nižšího napětí. Zároveň umožnila vyšší stupeň depozice než bylo dříve možné se stejnosměrným proudem bez magnetů.

Jednou z nevýhod prvních magnetronových zdrojů bylo to, že plazma byla účinně polapena blízko povrchu rozprašovaného teče. To znamenalo, že reaktivní plyny nemohly být efektivně odděleny v blízkosti substrátu, iontové bombardování substrátu bylo málo účinné a to vedlo ke špatné kvalitě povlaků. Problém byl částečně vyřešen přidáním pomocného ionizačního zdroje nebo použitím vysokofrekvenčního rozprašování. Vynález nevyváženého magnetronu „Windows and Savvides“ roku 1986 přinesl lepší řešení. Nevyvážený magnetron povolí některým elektronům únik z elektromagnetického pole a vytvoří plazma v místech dále od povrchu terčů když je odcházející magnetické pole přesměrováno na jiný magnetronový zdroj (ze severního na jižní pól), tím se oblast tvorby plazmatu významně zvětší.¹⁸

4.2. Druhy povlaků, jejich použití, vlastnosti a testování

V současnosti se používání otěruvzdorných vrstev pro řezné, tvářecí a jiné nástroje stává samozřejmostí. Pro moderní metody obrábění a tváření jsou PVD vrstvy nezbytným předpokladem úspěšného nasazení nástroje. V dnešní době je nabízeno široké spektrum PVD vrstev, které se s vývojem nových technologií a požadavků trhu neustále rozšiřuje. Použití a způsob opotřebení nástroje zásadním způsobem ovlivňují volbu povlaku s ohledem na jeho fyzikální a chemické vlastnosti. Dobře použitá PVD vrstva výrazně zvyšuje užité vlastnosti nástroje. Mezi základní fyzikální vlastnosti vrstev patří tvrdost, tloušťka, drsnost, adheze a kluzné vlastnosti. Nejdůležitějšími chemickými vlastnostmi jsou odolnost vůči oxidaci, chemická a tepelná stabilita.

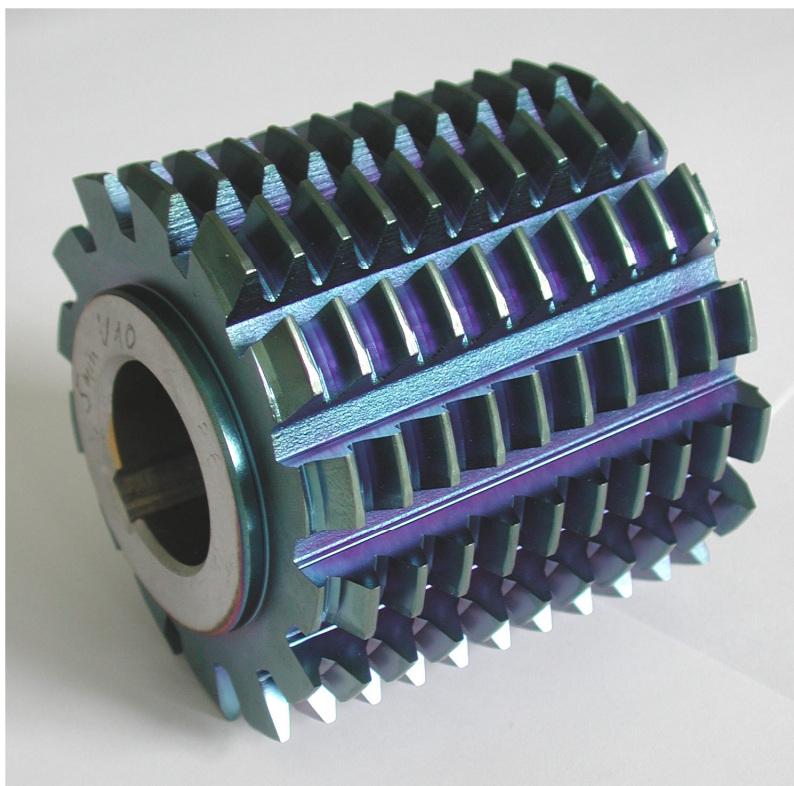
4.2.1. Povlaky v třískovém obrábění

Povlaky na řezných materiálech pro obrábění mají vyšší tvrdost, než samotný řezný materiál, snižují řezné síly, teploty a koeficient tření a brání difúznímu mechanismu opotřebení. Pro praktické užití je tloušťka povlaku regulována v rozsahu 2 až 10 μm . Z pohledu geometrie řezných nástrojů není mnohdy silnější vrstva akceptovatelná. Dochází k zaoblení řezných břitů a následně k nárůstu řezných sil, jež mohou způsobit destrukci ostří nebo minimálně snížení životnosti nástroje či zhoršení kvality obráběného povrchu. Dalším důvodem omezení tloušťky standardních PVD vrstev je jejich vnitřní zbytkové pnutí. Dosahuje u metody obloukového napařování nezřídka i 5 až 7 GPa. (u metody magnetronového rozprašování je vnitřní zbytkové pnutí třetinové) Z hlediska mechanických hodnot pro povlakování používaných materiálů jsou to hodnoty extrémně vysoké. Například mez kluzu běžných HSS materiálů je okolo 3 GPa (ČSN 19 830), slinutého karbidu řady K cca 5 GPa. Při větších tloušťkách vrstev tak dochází k nárůstu mechanického namáhání nejenom podkladového materiálu ale zároveň je namáháno i rozhraní mezi povlakem a podkladem. V kritickém okamžiku povolí nejslabší článek řetězu.²⁸

Mezi výhody povlakování nástrojů pro třískové obrábění patří:

- Úspora nákladů - povlakované nástroje lze používat s podstatně vyššími řeznými rychlostmi, čímž se zkracují hlavní doby zpracování a tím i náklady na obrábění. Delší doby životnosti vyžadují méně častou výměnu nástrojů a díky tomu klesají náklady na seřizování.

- HSC a zpracování za sucha - u vysokorychlostního třískového obrábění (HSC) a při zpracování za sucha vznikají extrémně vysoké teploty. Díky vynikající tepelné stabilitě, tvrdosti za tepla a odolnosti vůči oxidaci povlaku se teplo odvádí prostřednictvím třísky, aniž by zatěžovalo ostří nástroje.
- Zpracování tvrdých materiálů - tvrdé povlaky odolné proti opotřebení umožňují zpracovávat tvrzené materiály do tvrdosti 63 HRC. Nástroje s definovaným ostřím umožňují zpracování hotových výrobků z tvrdých materiálů, takže není třeba obrobky dodatečně brousit.
- Obtížně obrobitelné materiály - slitiny hliníku, titanu a hořčíku a vysoce legované oceli jsou obtížně obrobitelné. Zpracování takových materiálů usnadňují speciální povlaky s nízkým součinitelem tření a malými sklony k adhezi.
- Speciální nástroje - díky povlakům stříženým na míru se zvyšuje výkon speciálních nástrojů (například mikronástrojů).
- Opětovné povlakování - pokud se naostřené nástroje opět povlakují, dosahují stejného výkonu jako povlakované nové nástroje a celková životnost nástroje se prodlužuje (obr. 33). Opětovné povlakování je nutné, pokud mají být ve výrobních linkách dodrženy předem dané doby životnosti, řezné rychlosti a stabilita procesu.²⁴



Obr. 33 Odvalovací fréza²¹

4.2.2. Povlaky ve tváření

Nanášení povlaků na nástroje pro tváření a lisování je prováděno za stejným účelem jako u nástrojů pro třískové obrábění, a sice zvýšení životnosti nástroje a snížení výrobních nákladů. Povlaky použité pro tvářecí nástroje se odlišují zejména svou tloušťkou, ta se může pohybovat v rozmezí 30 - 100 μm . Povlakování v klasickém režimu, kdy vrstva povlaku roste rychlostí 1 – 2 $\mu\text{m}/\text{hod.}$ by trvalo desítky hodin, a takové vytvoření vrstev je ekonomicky neúnosné. Proto povlakovací zařízení musí pracovat v jiném režimu. Další problém je vnitřní pnutí v povlaku, které roste s rostoucí tloušťkou nanesené vrstvy. Důležitým krokem bylo nalezení kontroly vnitřního pnutí v povlaku. Nejnižší hodnoty pnutí jsou spojeny s povlaky TiN a CrN. Je rovněž znám příznivý vliv Ni na kompenzaci vnitřního stresu.²⁸

Mezi výhody povlakování nástrojů pro tváření patří:

- Delší životnost - povlaky v aplikacích tváření chrání díky své vysoké tvrdosti funkční plochy nástroje, řezné hrany a tažné poloměry vůči abrazivnímu opotřebení. Tím se podstatnou měrou prodlužuje doba životnosti.
- Nižší výrobní náklady - díky vyšší životnosti nástroje je možný vyšší počet zdvihů, vyšší produktivita a snížení jednicových časů.
- Méně maziv - systémy povlaků, které kombinují tvrdou základní vrstvu s krycí vrstvou o nízkém koeficientu tření, redukuje adhezní opotřebení. Pak lze pracovat s mazivy šetrnějšími k životnímu prostředí nebo nasucho. Odpadá nutné čištění obrobků, které bývá jinak většinou náročné.
- Vyšší výrobní jistota - výrobní jistota se zvyšuje, protože povlakování snižuje zatížení nástrojů a tím také riziko prasknutí. Na nástrojích k tváření plechů může takový povlak sloužit jako indikátor opotřebení. To umožňuje včasnou renovaci nástrojů.
- Lepší kvalita povrchů - rovněž menší opotřebení a méně studených svarů zlepšují kvalitu povrchu výrobků, které pak vyhovují vysokým optickým nárokům. Tím jsou dány také lepší předpoklady následného galvanického zúšlechťování.
- Renovace poškozených nástrojů - nanášení silných povlaků umožňuje renovaci opotřebených tvářecích nástrojů, pokud je povlak nanesen v tloušťce větší, než jejich opotřebení.²⁴

4.2.3. Povlakování forem na zpracování plastů

Povlakování forem určených na lisování a vstřikování plastů přináší mnoho předností a výhod, kterých by nebylo možno žádnou jinou technologií dosáhnout. Hlavními výhodami jsou:

- Nižší výrobní náklady - podstatně delší doba životnosti, kratší doby cyklů a lepší chování za provozu u tvářecích nástrojů zvyšují produktivitu při vstřikování a snižují jednicové náklady.

- Lepší vyplnění formy – nanesení povlaku zajišťuje lepší vyplnění formy, protože tavenina zůstává déle tekutá. Výskyt vtaženin se snižuje díky déle působícímu tlaku.
- Nižší síly na vyjmutí z formy - povlak snižuje náchylnost k lepení a díky tomu je vyjímání z forem snazší. Většinou dokonce není třeba používat separační prostředky.
- Vyšší odolnost proti opotřebení - při zpracování abrazivně působících tavenin se podstatně snižuje opotřebení díky vysoké tvrdosti povlaku. Povlak navíc chrání před poškozením při čištění a údržbě.
- Lepší kvalita výrobků vyrobených vstřikováním - díky lepšímu vyplnění formy a brilantním povrchům je možno vyrábět vysoce kvalitní díly a sníží se množství zmetků.
- Dobrý indikátor opotřebení - změny barvy na povlakovaných površích umožňují včas rozpoznat opotřebení a včas opravit drahé tvářecí nástroje.
- Jednoduché čištění - na formě se vytvoří nános materiálu až po podstatně vyšším počtu cyklů a lze ho odstranit jednoduchými prostředky. Delší intervaly čištění a rychlejší čištění zvyšují provozuschopnost a dostupnost nástrojů.
- Chod nasucho - díky nižším koeficientům tření jsou pohyblivé prvky formy (například vyhazovač, smýkadlo, vodicí prvky, jádra) chráněny účinně proti zadření i při chodu nasucho.²⁴

4.2.4. Jiná využití povlaků

Technologie povlakování má mnohem širší využití, než jen ochrana nástrojů proti opotřebení. Využití povlaků zasahuje mnohé obory a odvětví průmyslu, kde pomáhají, podobně jako ve strojírenství posouvat hranice využitelnosti a životnosti dále, než bylo doposud myslitelné. Povlaky jsou také použitelné např. v :

- Lékařství – ochrana proti korozi, provoz bez maziv kvůli hygieně
- Potravinářský průmysl – ochrana proti korozi, provoz bez maziv, ochrana proti opotřebení a zadírání komponentů strojů.
- Textilní průmysl – svorky jehlových mechanických stavů a vodítka nití.
- Automobilový průmysl – snížení tření a opotřebení komponentů (ložiska, písty, ventily, ozubená soukolí, vstřikování paliva aj.)
- Fluidní technologie – ochrana komponentů proti korozi, delší intervaly údržby, lehčí konstrukce, náhrada dražších materiálů, vyšší tlaky a otáčky aj.
- Optika – nanášení povlaků na čočky (odolnost vůči poškrábání, odraz škodlivých záření).
- Dekorativní účely – různorodost barev, imitace drahých kovů.
- Elektrotechnika – nanášení vodivých a nevodivých povlaků např. na čipy.²⁴

4.2.5. Druhy povlaků nanášených pomocí PVD

Dnešní výrobci povlaků nabízí své produkty v široké škále použití a vlastností. Povlaky lze rozdělit na základě chemického složení a fyzikálních vlastností. Povlaky mohou být vytvořeny na bázi Ti, Cr, Al, Si, Zr, B, C a jiných prvků, kde každý prvek a každý poměr nanesených prvků vnese do povlaku něco nového. Z fyzikálního hlediska lze dělit povlaky na základě vlastností, jako jsou tvrdost, koeficient tření, maximální teplota použití, adheze, vnitřní zbytkové pnutí, tloušťka a barva (pro dekorativní účely) (tab. 4).

Fyzikální vlastnosti ovlivňuje do značné míry způsob nanášení povlaku, struktura povlaku, teplota a rychlost depozice, chemické složení povlaku a poměr prvků v něm obsažených. Tyto rozdíly ve vlastnostech jsou často natolik markantní, že povlak vytvořený za mírně pozměněných podmínek (např. poměr prvků Ti a Al v povlaku TiAlN) vykazuje rozdílné vlastnosti, a tím i jeho použitelnost je zcela jiná. Konkrétním příkladem může být povlak TiAlN, který je nabízen mnoha výrobci a vyráběn odlišnými technologiemi. Srovnány byly povlaky společností CemeCon, Oerlikon Balzers, a Ionbond (tab. 3).

Tab. 3 Porovnání TiAlN povlaků různých výrobců. ^{21, 22, 24}

Název povlaku	Tvrdost HV0,05	Max.teplota použití	Koef.tření proti oceli	Použití
ALOX SN ²	3500	1000	0,3	Obrábění ocelí, litin, nerez. a legovaných ocelí. Vhodný pro vrtání
TINALOX SN ²	3500	1000	0,3	Obrábění ocelí, litin, nerez. a legovaných ocelí
HSN ²	3800	1100	0,3	Obrábění materiálů s tvrdostí > 50HRC
HYPERLOX	3700	1100	0,3	Těžko obrobitelné materiály, výkonné obrábění
FUTURA NANO	3300	900	0,3 – 0,35	Vrtání, soustružení, HSC, obrábění za sucha
FUTURA TOP	3300	900	0,25	Vrtání do hloubky, obrábění za sucha
LUMENA	3400	900	0,3 – 0,35	Lisování, tváření, vstřikování plastů, odlévání Al
MICRAN	3300	900	0,3 – 0,35	Obrábění a lisování nejmenších dílů
Maximizer top	3300	900	0,3	Výkonné obrábění
Maximizer nano	3400	1000	0,3	Výkonné obrábění
Maxinsert	3400	1000	0,3	Povlak VBD
CeramCoat	3400	1000	0,3	Povlak keramických VBD

Ze srovnání plyne, že koeficienty tření se pohybují na hodnotě $\pm 0,3$ avšak tvrdost a max. teplota použití jsou již rozdílné. Čísla nejlépe hovoří pro povlaky společnosti CemeCon, využívající technologii magnetronového rozprašování. Tímto způsobem připravené povlaky vykazují nejlepší vlastnosti.

Tab. 4 Vlastnosti vybraných povlaků. ^{21, 24}

Povlak	Tvrdost HV 0,05	Koeficient tření	Max.teplota Použití [°C]	Barva
TiN	2300	0,4	600	zlatá
TiAlN	3300	0,3	1000	fialovo - šedá
AlCrN	3200	0,35	1100	modro – šedá
CrN	1750	0,5	700	šedo - stříbrná
TiCN	3000	0,4	400	modro – šedá
TiB ₂	4000	0,3	900	šedo - stříbrná
DLC	>2000	0,1 – 0,2	350	černá

• **TiN** - S povlakem z nitridu titanu to všechno začalo - a ještě dnes jde o osvědčenou a všestranně použitelnou standardní vrstvu. Chrání účinně proti abrazivnímu a adheznímu opotřebení. Často se také nanáší na předměty z dekorativních důvodů nebo jako indikátor opotřebení.²⁴

• **TiAlN** – Díky svým výborným vlastnostem je použitelný v širokém rozmezí obrábění kovů a jiných výrobních aplikací. Důvod přidavku Al k TiN je ten, že při obrábění se při zahřátí TiAlN za pomoci vzdušného kyslíku tvoří na povrchu povlaku Al₂O₃ a tím je i zvýšena pracovní teplota na 900 °C z původních 500 °C u TiN. Al₂O₃ chrání povlak proti další oxidaci. Výsledkem je vyšší stálost za tepla než u jiných povlaků.²⁵

• **TiCN** – Povlak TiCN je tvrdší a má nižší koeficient tření než TiN, nicméně nedokáže jej nahradit ve všech aplikacích. Jeho doporučované využití je pouze pro lisování, obrábění s chlazením a tam, kde pracovní teplota není vyšší, než 400 °C.

• **AlCrN** – Vysoce výkonná vrstva bez obsahu Ti. Vyznačuje se velmi vysokou odolností proti oxidaci a vysokou odolností za tepla. Tyto vlastnosti se vyznačují jak za konvenčních podmínek, tak i při zpracování spojeném se silným mechanickým zatěžováním.

CrN – Houževnatý tenký povlak s vysokou tvrdostí, dobrou odolností proti oxidaci a nízkým koeficientem tření je ideální pro tváření kovů a plastů. CrN je více odolnější proti korozi než TiN, zvláště pak ve vodních roztocích. Je používán jako náhrada za Cr povlaky. Tvrdost CrN je přibližně 2x větší než tvrdost Cr.²⁴

• **TiB₂** – Povlak speciálně vyvinutý pro vysoko výkonné obrábění hliníku a hliníkových a neželezných slitin. S nízkou afinitou k hliníku je TiB₂ velmi odolný proti tvorbě nárůstku. Extrémně hladký povrch snižuje tření na čele a dělá obrábění snadnější. Vysoká tvrdost rovněž zaručuje vysokou odolnost proti opotřebení.²¹

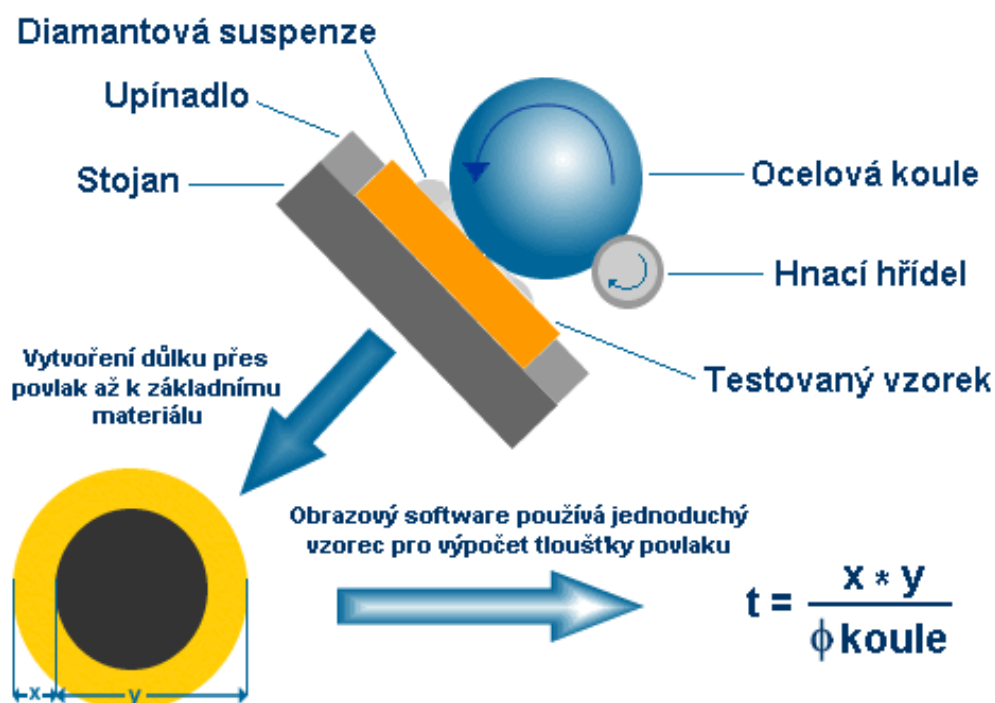
• **DLC** - je vhodný pro nejvyšší namáhání z hlediska opotřebení a vysokou relativní rychlost, i při zpracování za sucha. Silnými stránkami této vrstvy jsou ochrana proti abrazi, tribooxidaci a adhezi (zadírání). Tato vrstva umožňuje plošný tlak, který za normálních provozních podmínek vede k okamžitému zadření a vzniku studených svarů. Ztráty třením jsou zredukovány na minimum. Dobrá odolnost proti korozi chrání před poškozením substrátu.²⁴

4.2.6. Testování kvality povlaků

Hodnocení povlaků je důležité pro posouzení toho, v jaké kvalitě bylo povlakování provedeno a zdali nebyl vyroben vadný povlak, který neodpovídá požadavkům zákazníka. Primárně se výstupní kontrole kvality po každém procesu povlakování hodnotí tloušťka nanesené vrstvy a adheze povlaku k substrátu. Dále je možno testovat i tribologické vlastnosti povlaku, tvrdost, drsnost a ke složitějším zkouškám patří testování odolnosti vůči oxidaci a testování chemické a tepelné stability.

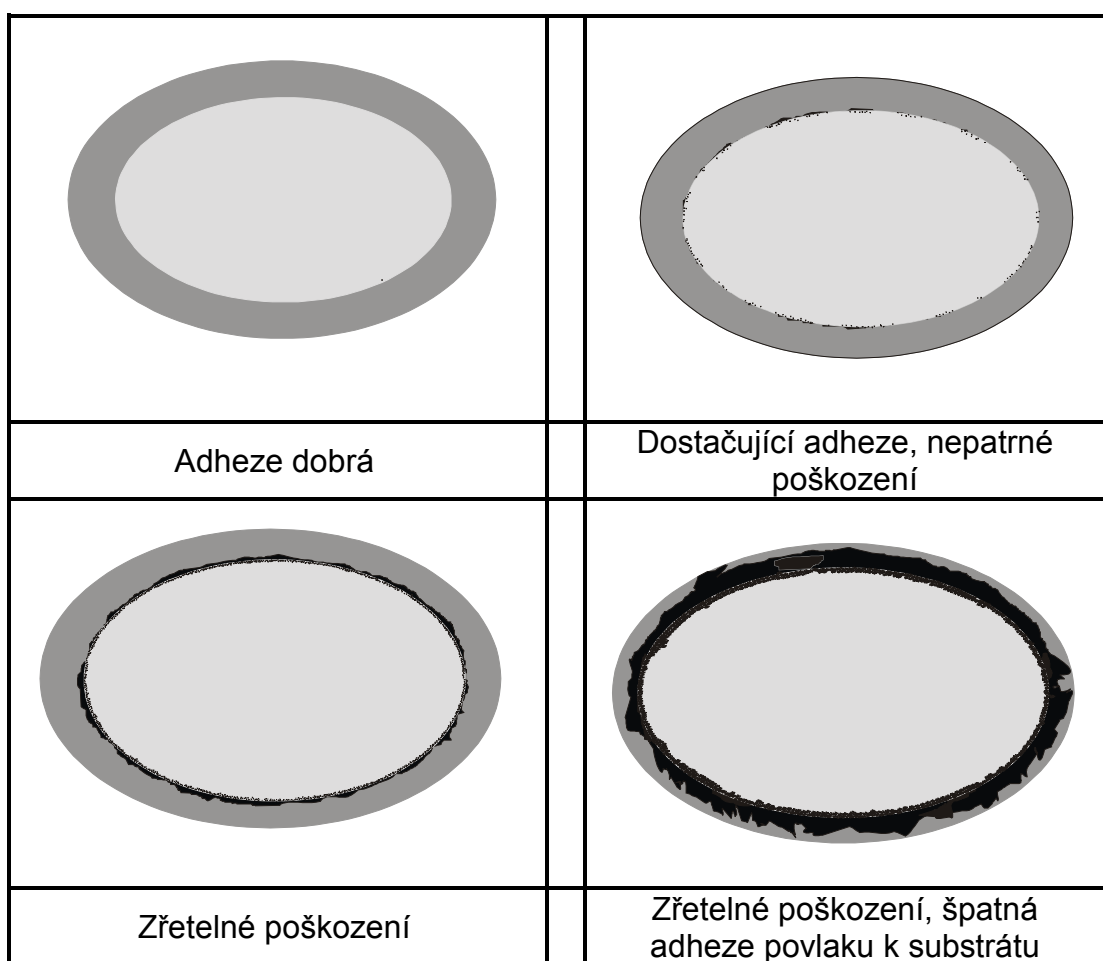
Hodnocení tloušťky povlaku kalotovým testem

Touto metodou je možno rychle a levně změřit tloušťku povlaku na nástroji. Rotující ocelová kulička s definovaným průměrem vybrušuje za působení diamantové suspenze kulový vrchlík přes povlak až k základnímu materiálu. Povlak se jeví v kulovém vrchlíku na rovině ploše jako 2 soustředné kružnice a na válcové ploše jako dvě soustředné elipsy. U multivrstvých povlaků je těchto kružnic víc, v závislosti na počtu nanesených vrstev. Pod mikroskopem jsou kružnice, resp. elipsy proměřeny a pomocí vzorce (obr. 34) je vypočtena tloušťka povlaku. Ta se dá rovněž určit i za pomoci mikroskopu a příslušného software, který na základě zadaného zvětšení proměří velikost kulového vrchlíku a vyhodnotí tloušťku povlaku.



Obr. 34 Test vybrušením kulového vrchlíku ²⁵

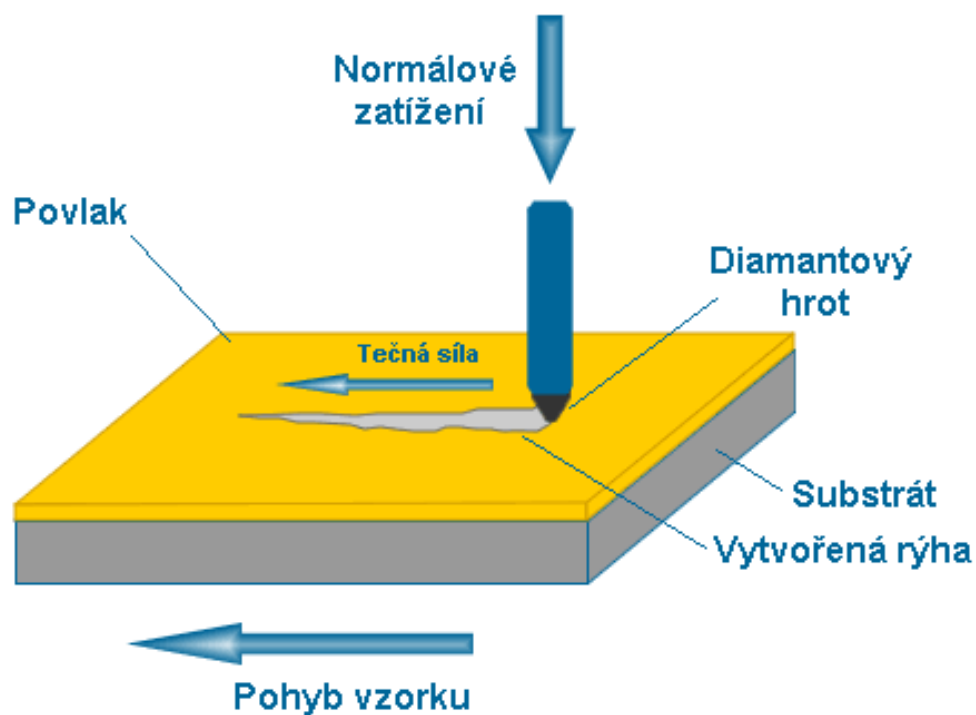
Kalotovým testem je rovněž možno posoudit adhezi povlaku na slinutém karbidu. Zkoumá se přechod mezi povlakem a substrátem, zdali se zde nacházejí místa kde povlak ztratil soudržnost jejich množství a šířka (obr. 35).

Obr. 35 Zjištění adheze z kalotového testu.¹³**Scratch test**

Jedním ze základních požadavků, které jsou vyžadovány od PVD povlaků je výborná adheze povlaku k substrátu. Je to vlastnost, která je definována styčnými silami mezi dvěma povrchy. Nejpoužívanější metodou pro hodnocení adheze PVD povlaku je scratch test (obr. 36).

Princip scratch testu je jednoduchý. Diamantová špička o zaoblení 200 μm je konstantní rychlostí a zvyšující se normálovou silou posouvána přes napovlakovaný povrch substrátu. Scratch test přivádí napětí na rozhraní povlaku a substrátu, což vede k popraskání, nebo oddělování povlaku. Kritická normálová síla, při které se objeví první poškození povlaku je nazývána jako kritická zátěž L_c .

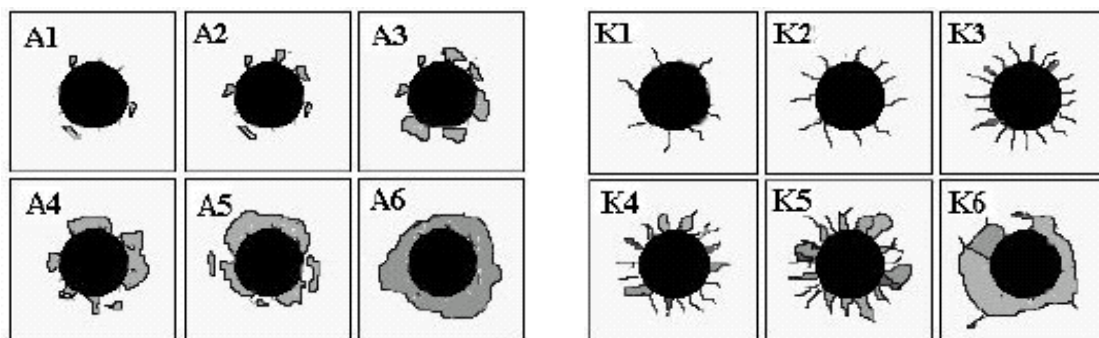
Typické zařízení pro scratch test může zjišťovat poškození povlaku třemi způsoby. Siloměrem, který měří změnu tření, akustickou emisí, nebo pozorováním vytvořené rýhy za pomoci optického mikroskopu. Nejlepší testovací zařízení užívají všechny tři metody pro zjišťování poruch povlaku. Síla akustické emise je závislá na druhu chyby povlaku během testování, např. pukliny, štípnutí povlaku (chyba soudržnosti povlaku), odlamování povlaku (chyba adheze povlaku). Proto je důležité pozorovat chyby povlaku po adhezním testu pomocí optického mikroskopu, pro určení kritické zátěže.

Obr. 36 Princip scratch testu ²⁵

Zařízení pro scratch test může být použito pro hodnocení adheze mnoha různých druhů substrátů, jako kovových slitin, polovodičů, skla a lámavých materiálů. Nejpřesnější je při testování adheze tvrdých povlaků na poměrně tvrdých substrátech > 54HRC. ²⁵

Mercedes test

Jiným testem adheze povlaků vynalezený „Unii německých inženýrů“ je test známý jako Daimler-Benz test (nebo také Mercedes test). Tato zkouška využívá standardní Rockwellův měřič tvrdosti, osazený diamantovým indentorem typu C, se zatížením 150kg.

Obr. 37 Klasifikace vtisků u Mercedes testu ¹³

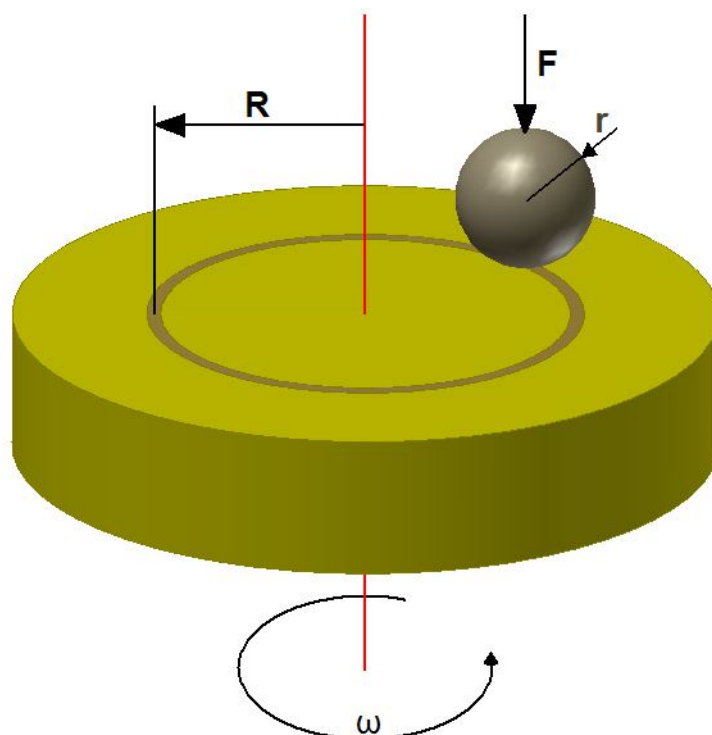
Výsledek zkoušky se obdrží pozorováním optickým mikroskopem a klasifikací adheze na stupnici 1 - 6 v závislosti na stupni odloupenutí (A1 – A6) nebo popukání (K1 – K6) povlaku okolo indentoru (obr. 37). Pouze vtisky klasifiko-

vané jako 1 a 2 odpovídají dobré adhezi. Tato metoda dává výsledky rychle a s menší prací. Bohužel nám tento test nedá přesné hodnocení povlaku, důvodem je vliv tvrdosti substrátu a tloušťky povlaku. A z tohoto důvodu je minimální tvrdost podkladu pro přijatelný výsledek 54 HRC a maximální tloušťka povlaku 5 μm .²⁵

Metoda Pin on disc

Zařízení pro Pin on disc test měří tření a vlastnosti opotřebení při klouzání na suchých nebo namazaných plochách materiálů a povlaků. Zařízení se sestává z rotujícího disku, který je vyroben z materiálu jenž má být testován proti stacionární kouli, obvykle vyrobené ze slinutého karbidu nazývaní se pin. Nicméně povrch pinu může být rovněž opotřeben a testován na tření. Použitá zátěž, rychlost rotace disku a průměr dráhy na disku, kde probíhá test mohou být nastaveny uživatelem na základě jeho předchozích zkušeností s tímto testem (obr. 38).

Většina Pin on disc testovacích zařízení je kontrolována počítačem, který dokáže zaznamenat měřené tření v závislosti na čase, nebo dráze, kterou pin urazil pro budoucí vyhodnocení. Při sledování tření během testu je na začátku zkoušky tření na nejvyšším stupni, ale po určité době tření klesne na úroveň, na které již zůstane. Poté co je test u konce, je v dráze změřena tloušťka zbývajícího povlaku. Například metodou vybroušení kulového vrchlíku. Koeficient tření je spočítán podílem tření a použité zátěže.²⁵

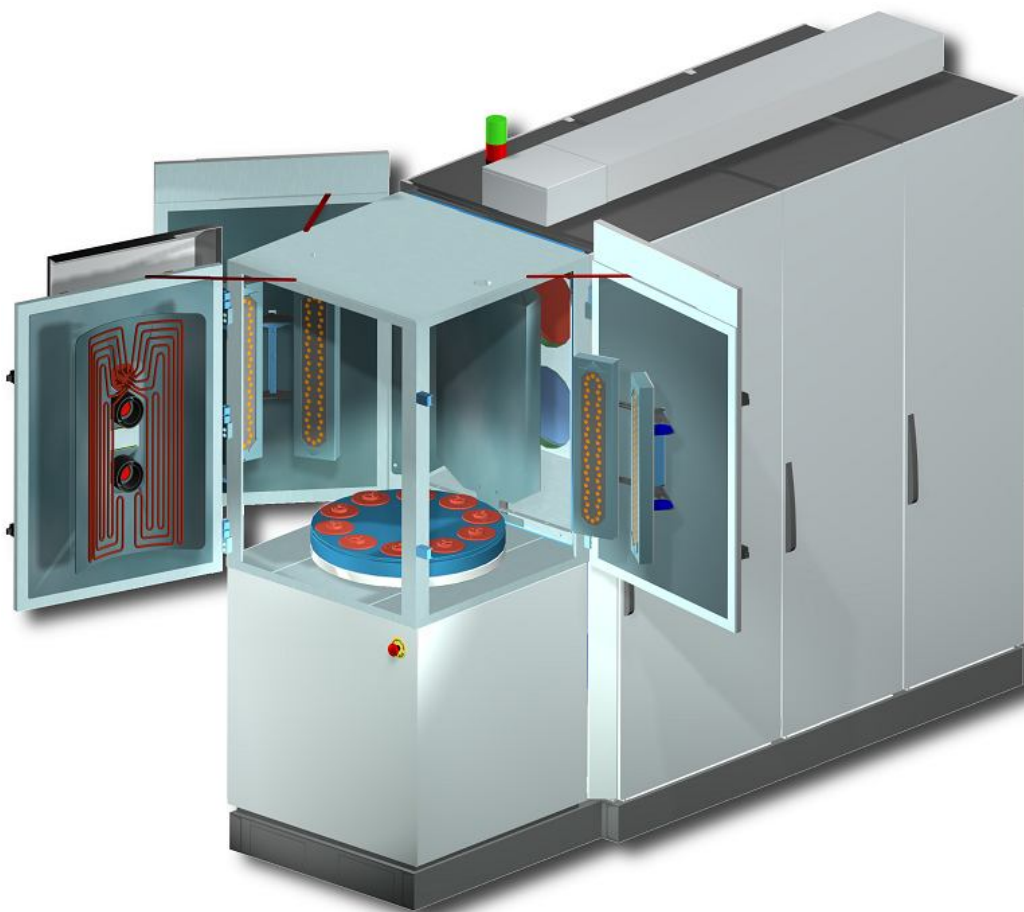


Obr. 38 Metoda Pin on disc

4.3. Povlakovací zařízení společnosti CemeCon s.r.o.

Moderní PVD povlakování je velmi složitý proces, který musí být plně pod kontrolou. Je třeba zajistit neustálou kontrolu a regulaci elektrických veličin, teplotu všech zařízení, tlaku a vakua v pracovním prostoru. K tomu patří zabezpečení stabilního připojení a přísunu elektrické energie, spolehlivého systému chlazení, dostatku pracovních plynů a v neposlední řadě i čistoty pracovního prostředí. Jednotlivé povlakovací stroje se vzájemně liší principem nanášení povlaků, výkonem povlakování, rozměry pracovního prostoru, maximální hmotností povlakovaných předmětů a mnoha jinými parametry. Díky stínovému efektu u PVD technologie bývají nástroje ve strojích umístěny zpravidla v důmyslně sestavených podstavcích a držácích, aby bylo zajištěno rovnoměrné nanesení povlaku na všech místech kde se povlak nacházet má. Existují různé způsoby uchycení nástrojů, závisející na velikostech, množství a druhu nástrojů. Různé systémy upínání jsou pro odvalovací frézy, stopkové nástroje, nebo pro vyměnitelné břitové destičky

Požadavky kladené na moderní povlakovací technologie jsou různé: široké spektrum aplikací, nástrojů a komponentů, povlakovacích materiálů, které jsou rozšířeny a vyvíjeny velkou rychlostí a požadavky na přizpůsobení se velikosti dávky kterou je třeba napovlakovat. Teoreticky je na splnění těchto požadavků potřeba mnoho rozdílných systémů, ale ve skutečnosti nabízí CemeCon řešení s jedním systémem. Je to CC800[®]/9.



Obr. 39 Povlakovací zařízení CC800[®]/9 ML ²¹

CC800[®]/9 je povlakovací systém, který nezklame. Vybaven plasma booster technologií je tento systém tou nejlepší volbou pro výrobce, kteří provozují flexibilní a cenově efektivní povlakování v širší škále druhů a velikostí nástrojů. Tímto zařízením je možno nanášet téměř všechny materiály pro povlakování, tímto se otevírá teoreticky nekonečně mnoho možností ve výběru zvláštních řešení povlaků.

CC800[®]/9 je nabízeno v mnoha rozdílných modifikacích, aby mohly být uspokojeny požadavky zákazníka. Všechny modifikace jsou založeny na stejném základě. Díky tomu je možné provádět změny a vylepšení rychle a cenově výhodně. Následkem toho může být systém přizpůsoben požadavkům s ohledem na zvyšující se objem povlakovaných nástrojů.

Kvalita povlakování je stejná na všech modifikovaných zařízeních pracujících se systémem CC800[®]/9. Nové a současně povlaky mohou být nanášeny všemi zařízeními pracujícími s tímto systémem. Všechna zařízení pracují rychle, ekonomicky a flexibilně, povlaky jsou vysoce kvalitní, hladké a mají silnou adhezi k substrátu. Díky modulárnímu designu, využívající CemeCon je CC800[®]/9 ML (obr. 39) vždy na popředí vývoje. Rovněž může být vylepšen pulzní technologií pro nanášení nevodivých povlaků, které zvyšují množství možného uplatnění zařízení. Konkurenceschopnost zařízení je zajištěna nepřetržitým vývojem, neustálými úpravami a vývoji programů.

Pokud výrobní oddělení požaduje navýšit kapacitu výroby s volitelným flexibilním modulem, je možno zvýšit kapacitu systému ze 6 věží ve kterých jsou umístěny nástroje na 10 (tab. 5). Pokud to stále nestačí, může být ML rovněž vylepšen na formát CC800[®]/9 XL. To se odlišuje ve velikosti pracovního prostoru.²¹

Tab. 5 Charakteristika povlakovacího zařízení CC800[®]/9 ML.²¹

Povlakovací komora, (d x š x v)	[mm]	850 x 850 x 1000
Povlakovací prostor (Ø x v)	[mm]	400 x 400
Maximální rozměry nástroje (Ø x v)	[mm]	450 x 850
Počet věží s nástroji (rozšířené)	[kusů]	6 (10)
Hmotnost dávky	[kg]	250 / 500
Počet terčů x jejich délka	[mm]	4 x 500
Doba pro nanesení 3µm TINALOX	[h]	5
Vnější rozměry	[mm]	1010 x 3000 x 2100

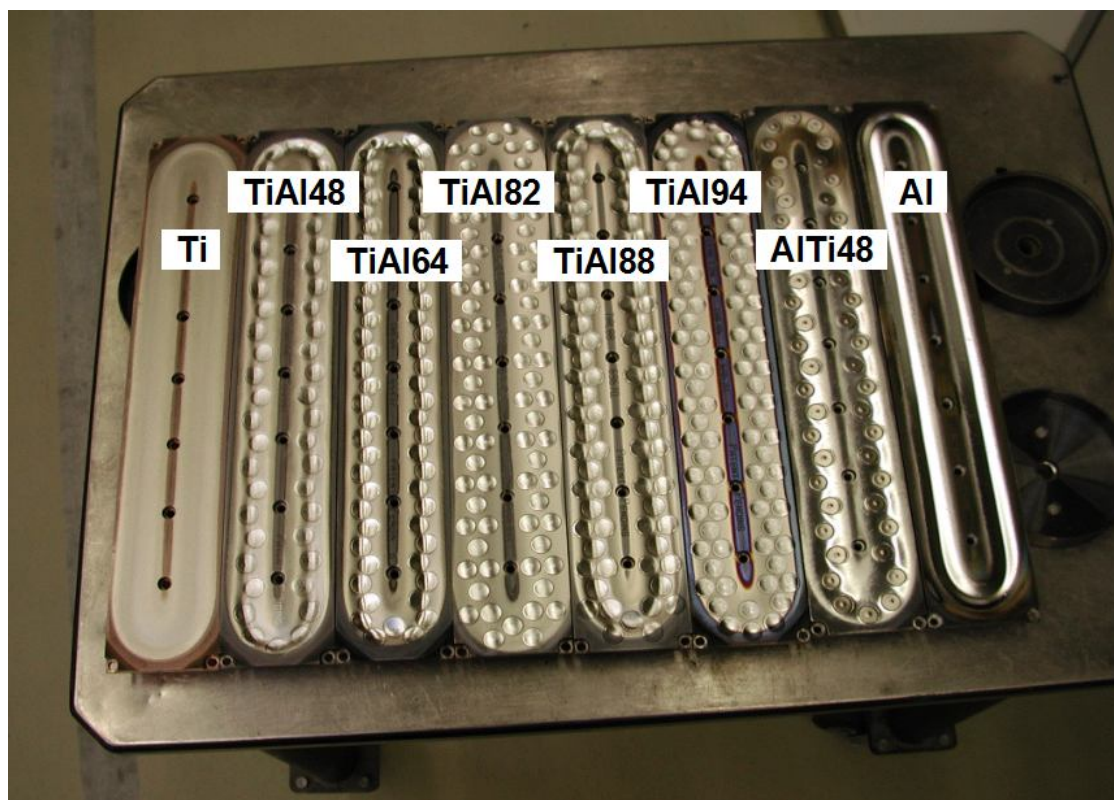
4.4. Terče

Terče pro PVD povlakování jsou dvojího druhu, planární a rotující válcové. Terče mohou být v zařízení umístěny ve středu komory, centrálně k povlakovaným nástrojům (rotační válcové terče) a nebo vně nástrojů, např. ve dveřích komory. Poslední variantou je kombinace centrálního a bočního umístění. V různých pozicích se navíc může měnit i počet terčů. Pro přípravu složitějších a vícekomponentních povlaků není výjimkou použití dvou, tří i čtyř různých

terčů, mnohdy i s odlišnou funkcí. Například již užití dvou elektrod je velmi zásadní. Různými hodnotami proudů na elektrody a jejich poměrů lze měnit stechiometrii, rychlost růstu a částečně i drsnost vrstev bez fyzické výměny materiálu terčů. Takto se připravuje základní struktura povlaků na úrovni mono-, multi- a gradientních vrstev. Zmíněná rotace nástrojů vykonávajících planetový pohyb je rovněž velmi důležitým parametrem, ovlivňujícím řezný výkon povlaků. Synchronizací rychlosti rotace ve vztahu k proudům na elektrody lze dosáhnout z hlediska tvrdosti optimalizované tloušťky nanovrstev (nanomulti-vrstev) cca 5 – 7 nm. V současnosti průmyslově využívané vrstvy jsou už většinou kombinací základních struktur. Sestávají mnohdy i z desítek mono-, multi a gradientních vrstev různých parametrů sladěných podle nároků předpokládané aplikace. Pro přesné řízení depozice je již naprosto nezbytné používat počítačem řízené systémy.³²

Terče používané spol. CemeCon

Zařízení spol. CemeCon využívají planární multikomponentní terče, tzn. ploché terče ve tvaru desky, kde jsou v základním materiálu terče nalisovány např. válečky z jiného materiálu v poměru daném na požadavek povlaku. Celý terč je odlit na měděné desce pro zajištění dobrého vedení el. proudu a hlavně kvůli odvádění tepla z terčů do elektrody (obr. 40). Terč je přišroubován k měděné elektrodě šrouby. Mezi terč a elektrodu je vložena uhlíková fólie pro zabezpečení dokonalého přenosu el. proudu. Chlazení terčů je důležité, protože při vysokých teplotách hrozí vytečení některých lehce tavitelných materiálů.

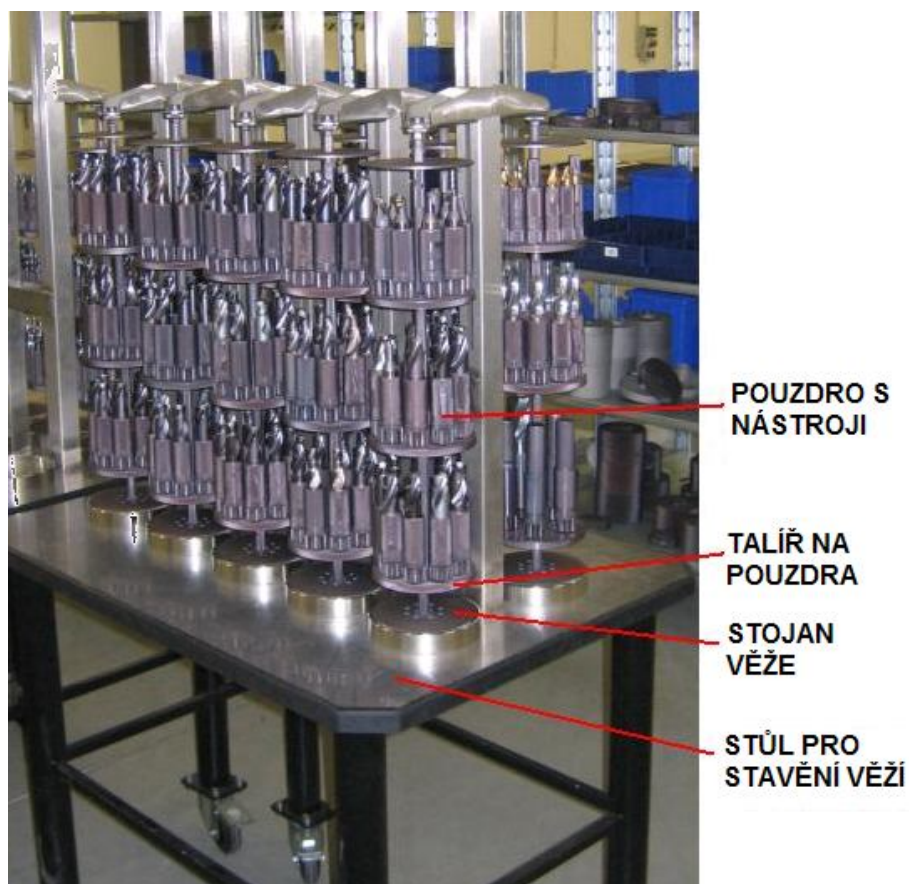


Obr. 40 Multikomponentní planární terče

4.5. Příprava stopkových nástrojů na povlakování

Poté, co jsou vysušené stopkové nástroje vytaženy z ultrazvukové myčky, kde byly umývány po přípravných operacích, jsou přemístěny na stanoviště šaržování.

Zde jsou nástroje vsazeny do zvláštních pouzder, která jsou nasazena na talířích. Pouzdra se navzájem rozlišují podle průměru a délky stopky nástroje. Na jejich povrchu jsou vytvořeny drážky, na základě kterých je možno rychle určit průměr díry pouzdra. Do jednoho pouzdra může být usazen jen jeden nástroj (výjimkou je nástroj o průměru stopky 3 mm, zde je jedno pouzdro opatřeno 3 dírami pro 3 nástroje). Je třeba dbát na to, aby z pouzdra vyčnívalo celé funkční ostří nástroje, jinak nebude napovlakováno. Pokud je díra v pouzdru hlubší, než délka stopky nástroje, je třeba vypodložit nástroj ocelovými kuličkami. Každé pouzdro je zespoda opatřeno dírou, za kterou je nasazeno na trn na talíři, tímto se může otáčet i s nástrojem kolem vlastní osy. Na talíře je možno nasadit 9 – 20 pouzder, v závislosti na jejich průměru.



Obr. 41 Nástroje připravené k povlakování

Následuje úsek stavění věží. Zde jsou talíře s pouzdry a nástroji stavěny na sebe tak, aby vytvořily válcovitou věž. Každý talíř je ve svém středu opatřen dírou, díky které může být nasazen na násadu stojanu věže. Stojany jsou umístěny na speciálních stolech, které usnadní práci a zabrání případnému pádu stojanu (obr. 41). Věž se staví tak, že se talíř nasadí přes násadu na stojan a položí na se na spodek stojanu. Zde je třeba dávat pozor na to, aby

nedošlo k záměně jednotlivých talířů. Mohlo by se snadno stát, že na ně bude nanesen jiný povlak, pokud se vloží do jiné věže. Poté jsou na násadu navlékány trubičky (v délkách 1, 5, 10, 20, 25, 50 a 100 mm) tak, aby přesahovaly nejvyšší bod na nástroji o 25 – 30 mm. Poté je nasazen na násadu stojanu věže další talíř. Díky trubičkám, které přesahují nástroje s prvního talíře, je zaručeno, že spodek druhého talíře nezasáhne špičku nástroje pod ním. Tímto způsobem pokračuje stavění věže až po stanovenou mez. Při překročení této meze nemůže být zaručena tloušťka povlaku na špičkách nástrojů na nejvýše umístěném talíři. Násada stojanu je na svém konci opatřena závitem, po postavení věže jsou všechny talíře staženy šroubem. Na úplný konec násady je našroubován jistící šroub pro uchycení věže k povlakovacímu stolu

Další operací je instalace věží na povlakovací stůl. Věže jsou převezeny na úsek s povlakovacími stoly. Rozlišuje se mezi dvěma druhy stolů se 6 nebo 10 (v závislosti na počtu věží) důmyslně sestrojených loží, na které jsou věže položeny. Tato lože se za pomoci ozubeného soukolí pod stolem otáčí kolem vlastní osy společně s otáčejícím se stolem. Věže jsou vsazeny do loží a nahore zajištěny za jistící šroub stabilizátorem. Když je věž dokonale zajištěna, připojí se k pouzdrům tzv. „klinkry“. Jsou to vlastně plíšky, které se zapřou o vroubkovanou část pouzder. Když se stůl otáčí kolem své osy, otáčí se s ním i věže kolem své osy a klinkry zajišťují otáčení pouzder na talířích kolem vlastní osy. Díky kombinacím planetových pohybů jednotlivých komponentů je zaručeno dokonalé napovlakování všech ploch nástroje. Pokud zůstane některé lože prázdné, je třeba na jeho místo vložit „falešnou věž“, je to zpravidla plechový válec odpovídající svou velikostí věži s nástroji. Následuje kontrola všech pouzder, zdali se bez problémů otáčejí kolem své osy. To je velmi důležité, protože jinak hrozí, že by nástroj byl napovlakován jen z jedné strany, zatímco druhá strana by zůstala bez povlaku.

Po kontrole je celý stůl vyzdvižen jednoúčelovým, bateriemi napájeným vysokozdvížným vozíkem „Ro-Ro“ a zavezen na ofuk do místnosti k tom určené. Poté je celý stůl převezen do povlakovacího zařízení.

4.6. Příprava odvalovacích fréz na povlakování

Připravit odvalovací frézy na povlakování je mnohem jednodušší než stopkové nástroje. Po vytažení nástrojů z ultrazvukové myčky jsou frézy převezeny k povlakovacímu stolu. Díky tomu, že jsou povlakovány frézy pouze o jedné délce, jsou držáky na povlakovacím stole již předem výškově nastaveny. Každý držák frézy je uložen v otočném loži, podobně jako věže s nástroji u stopkových nástrojů. Frézy jsou uloženy v držácích za ty stejné plochy jako později na frézce. Tímto plní držáky funkci clony proti povlaku na upínacích plochách. Pokud zůstane některý držák prázdný z důvodu malého počtu fréz, musí být do něj zasazena „falešná fréza“, jedná se o frézu, která byla stažena z produkce kvůli vylámaným zubům, nebo protože ji již nebylo možno více přeastřit. Pokud by nebyly tyto falešné frézy do produkční šarže vloženy, získaly by okolní frézy silnější povlak díky prázdnému místu v jejich blízkosti. To by mohlo mít nepředvídatelný vliv na funkci nástroje. Na vršek jedné z fréz je připevněn držáček na ocelový pŕlměsíček, na kterém se po povlakování provede test tloušťky povlaku kalotou. Tento test nemůže být proveden na hotové

odvalovací fréze. Stůl je poté odvezen vozíkem „Ro-Ro“ do povlakovacího zařízení. Někdy se pro urychlení přivezou odvalovací frézy přímo z myčky k povlakovacímu zařízení, a vkládají se na povlakovací stůl který je již v povlakovacím zařízení umístěn a připraven.

4.7. Příprava povlakovacího zařízení

Přípravu povlakovacího zařízení (obr. 42) je třeba vykonávat vždy před každým povlakováním. Příprava spočívá ve vizuální kontrole a čištění jednotlivých komponentů zařízení. Kontrole a čištění jsou podrobeny terče, otočné lože na kterém spočívá povlakovací stůl, booster, vyhřívání a povlakovací komora.



Obr. 42 Povolovací zařízení

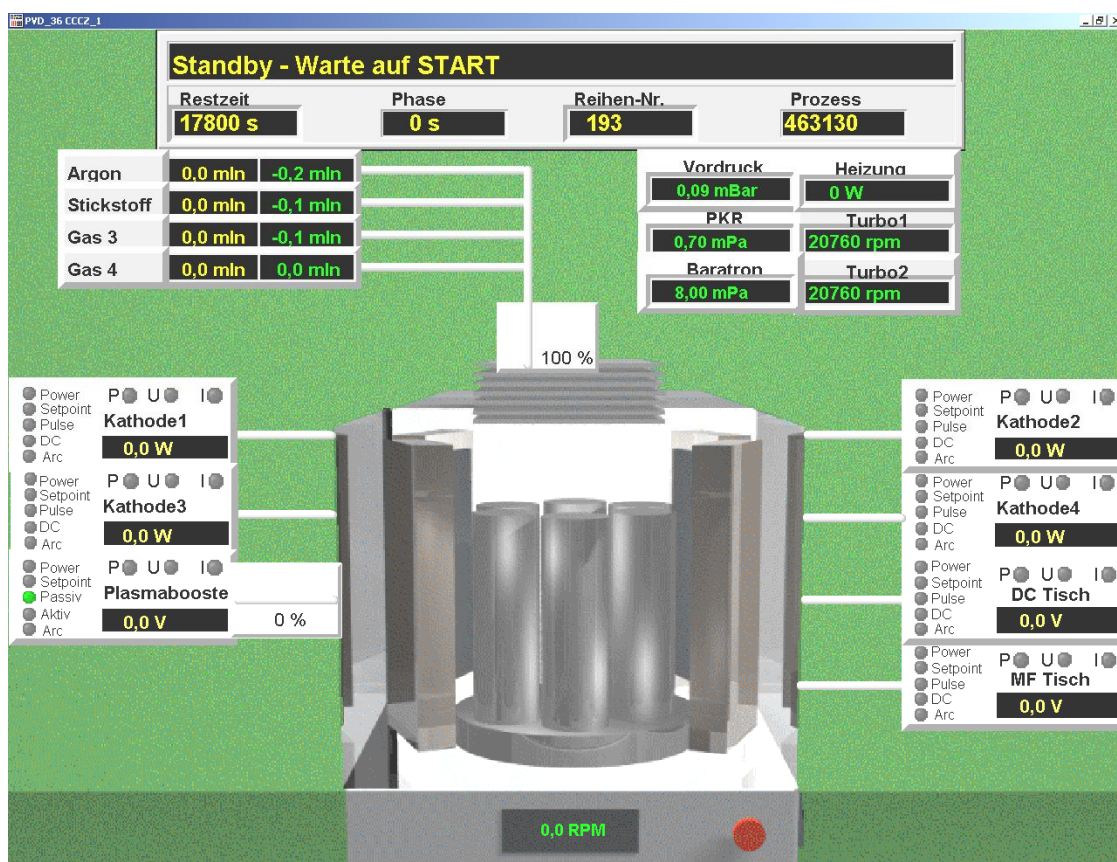
Terče jsou čištěny na tzv. mrtvých zónách, tj. zóna, kde je složka magnetického pole magnetronu rovna 0. Zpravidla se jedná o střed a okraje, okolo kterých se otáčí magnetický tunel. V těchto místech je terč minimálně rozprašován, během povlakování zde dochází ke tvorbě nežádoucích sloučenin, které je pro dodržení kvality napovlakované plochy třeba odstranit. Z terče je sejmout ochranný rám. Znečištění u Ti–Al terčů se odstraňuje pomocí brusné tkaniny. Znečištění Ti terče je mnohem větší, proto je třeba toto znečištění odstranit vibrační bruskou, na kterou je připevněn vysavač pro odsávání vzniklého prachu. Následuje utření terče hadříkem namočeným v ethanolu a ofouknutí stlačeným vzduchem. To proto, aby byl vysušen ethanol a odfouknuty drobné chloupky co zbyly na terči po hadříku. Předtím než je připevněn ochranný rám zpět na své místo je třeba z jeho okrajů odstranit nesoudržné zbytky povlaků. To se provádí běžnou rašplí. Po připevnění ochranného rámu je třeba přeměřit měrný odpor mezi rámem a terčem. Ten by měl být cca. 13 kΩ.

Topné spirály se čistí drátěným kartáčem. V těchto místech je vrstva povlaku díky tepelným dilatacím způsobeným při zapínání a vypínání ohřevu značně rozrušená a popraskaná. Proto odstranění nesoudržné vrstvy nepředstavuje větší problém.

Když je vše vyčištěno a zkontrolováno, vysaje se komora a příslušenství povlakovacího zařízení vysavačem od prachu a zbytků povlaku, které odletěly a odpadly z komponentů zařízení při ochlazování.

4.8. Spuštění procesu povlakování

Poté, co jsou povlakovací stoly s nástroji pevně usazeny v otočném loži povlakovacího zařízení, jsou ještě jednou zkontrolována pouzdra s nástroji, zdali se bez problémů otáčejí. Pokud je vše v pořádku, mohou být zavřeny dveře povlakovacího zařízení. Pro zvýšení jistoty správného utěsnění dveří, se pokaždé před jejich uzavřením přejede plátěnými rukavicemi po gumovém těsnění aby byly odstraněny případné nečistoty. Do řídicího počítače je zadán kód šarže a zvolen program povlakování.



Obr. 43 Prostředí programu Citect

Povlakovací zařízení je ovládáno přes program Citect (obr. 43). Tento program umožňuje celkovou kontrolu a ovládání povlakování. Díky němu je možno sledovat průběh povlakování, tlaky plynů, otáčky turbopump, teploty všech okruhů, průtoky všech pracovních látek, výkony elektrod a jiné důležité věci. Je možno rovněž nahlédnout do historie povlakovacího procesu pro poz-

dější analýzu případných vad povlakování. Pomocí tohoto softwaru lze i na dálku přes internet nalézt a identifikovat fyzickou závadu na povlakovacím zařízení.

Průběh povlakování

Po zmáčknutí tlačítka start je zařízení spuštěno a turbopumpy začnou vyčerpávat vzduch z komory. Pouhou vteřinu po započetí procesu již není díky podtlaku v komoře možno otevřít dveře zařízení. Souběžně s turbopumpami je spuštěno vytápění komory a otáčení povlakovacího stolu. První fáze ohřívání probíhá 2600 s.

Následuje další fáze procesu v délce 1800 s. Pracovní prostor je stále vytápěn, turbopumpy sníží svůj výkon. Přitom probíhá testování všech veličin a komponentů aby byla jistota že povlakování bude probíhat správně. Pokud by proběhlo špatně, mohlo by to znamenat znehodnocení nástrojů.

Po kontrole je další fází iontové čištění (iontové leptání). Nejdříve jsou do komory vpouštěny inertní plyny krypton a argon. Zároveň je snížen výkon vytápění. Po 900 sekundách je na povlakovací stůl přivedeno záporné stejnosměrné předpětí zatímco na 2 terče kladné stejnosměrné předpětí. Plyn v komoře ionizuje a povrch nástrojů je iontově čištěn. Celková doba iontového čištění činí 3600 s.

Po iontovém čištění následuje konečně proces povlakování. Na všechny terče je přivedeno záporné předpětí. Do komory je vpouštěn argon, který je nutný pro udržení výboje. V závislosti na druhu povlaku může být do komory vpouštěn i pracovní plyn tvořící složku povlaku. Povlakování trvá 6800 s.

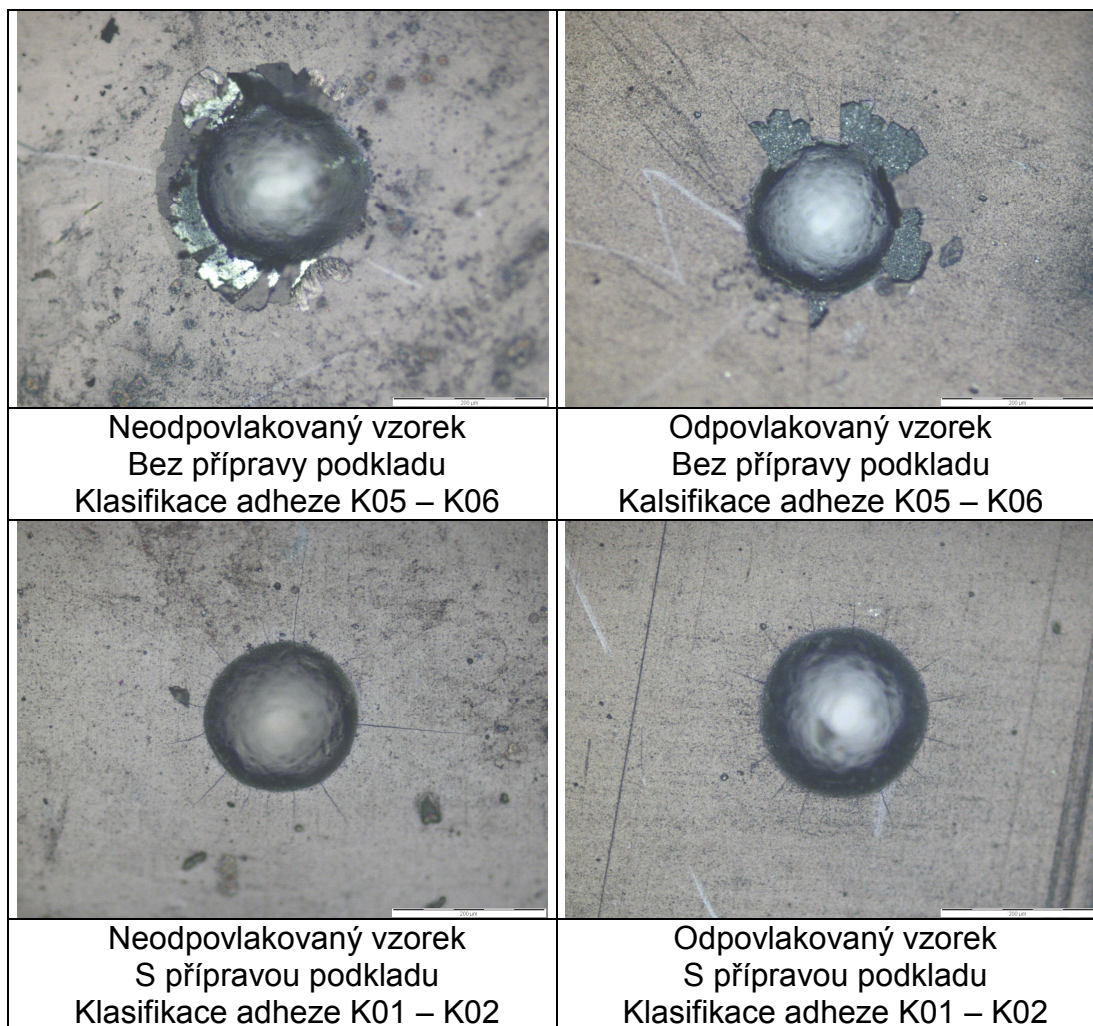
Poslední fází se ochlazování. Elektrody jsou odpojeny od zdroje napětí, a vyhřívání vypnuto. Jako chladicí plyn je do povlakovací komory vpouštěno helium. Ochlazovací plyn musí být inertní proto, aby nemohly vznikat na ohřátém povrchu nástrojů nežádoucí vrstvy (např. oxidy v případě kyslíku). Pro zvýšení chladicího účinku je zároveň navýšen výkon chlazení jednotlivých komponentů. Napovlakované nástroje jsou ochlazeny na 120 °C. Po ochlazení nástrojů jsou turbopumpy zastaveny a tlak v komoře vyrovnán na atmosférický.

4.9. Vlastní experiment

Pro ověření kvality povlaku na odpovlakovaném povrchu substrátu byl odpovlakovaný povrch opět opáren povlakem. Kvalita adheze povlaku při následném napovlakování je důležitým prvkem, neboť nemá smysl sice dobře odpovlakovat nástroj, avšak následně jej napovlakovat povlakem vykazujícím špatnou adhezi k substrátu.

Pro posouzení adheze povlaku byl vybrán pro srovnání leštěný vzorek, který doposud nebyl odpovlakován a vzorek, jenž byl odpovlakován metodou chemického odpovlakování slinutých karbidů. Na oba vzorky byl nanesen povlak Hyperlox. Přitom byla vzata do úvahy problematika přípravy podkladu před povlakováním. Jedna strana vzorku byla mikropískována, zatímco druhá strana nebyla. Z těchto pokusů byly vyřazeny vzorky odpovlakované metodou

chemického odpovlakování HSS a metodou elektrochemického odpovlakování. Oba vzorky vykazovaly příliš velké poškození neslučitelné s případným budoucím použitím pro odpovlakování. Adheze povlaku byla testována metodou „Mercedes test“.



Obr. 44 Výsledky testu

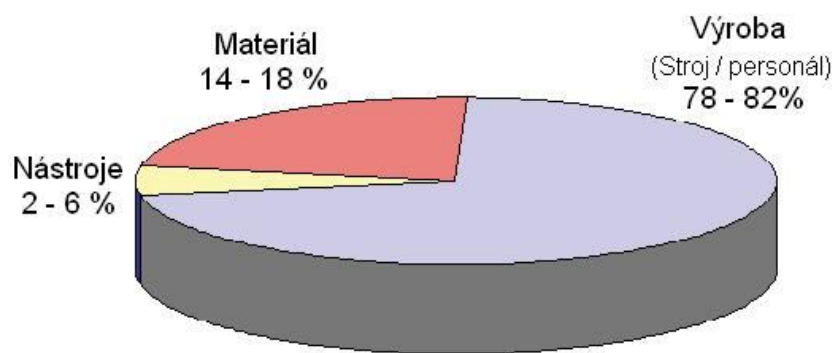
Výsledky testu (obr. 44) ukazují dobrou adhezi u vzorků, u kterých se dbalo na přípravu povrchu před povlakováním. Díky aktivaci povrchu při mikropískování získal nanesený povlak lepší adhezi k substrátu. Zároveň se potvrdila dobrá adheze k substrátu, jenž byl odpovlakován metodou chemického odpovlakování slinutých karbidů. Tento test spolu s analýzou povrchu substrátu dokazuje, že metoda chemického odpovlakování slinutých karbidů je vhodná pro odpovlakování SK a následnou depozici nového povlaku.

Byly rovněž pořízeny snímky rozhraní substrát – povlak, které se nacházejí v příloze 6.

5. Technicko – ekonomické hodnocení

Aspekty produktivity a hospodárnosti ve výrobě jsou ovlivňovány mnoha faktory, mezi nimiž obráběcí procesy zauímají význačné postavení. Hospodárnost obrábění je možné kvantifikovat stupněm dosažení co největšího efektu, z daných výrobních možností. Analýza technologických možností a vzájemných souvislostí jednotlivých prvků obráběcího systému stroj-obrobek-nástroj umožňuje významně ovlivnit produktivitu a hospodárnost celého obráběcího procesu (obr. 45).¹⁵

V dnešní době se každý výrobce snaží snižovat náklady na výrobu (obr. 40), za účelem dosažení maximálního zisku firmy. Snižování nákladů lze docílit několika různými způsoby, například zvýšením produktivity nasazením výkonnějších strojů a modernějších nástrojů.¹²



Obr. 45 Náklady na obrobek ⁴

Zvýšení produktivity pomocí nástrojů, lze docílit vhodnou kombinací tří složek, které ovlivňují využitelnost nástroje. Jsou to geometrie nástroje, řezný materiál a použitý povlak. Nalezením nejlepší kombinace těchto složek pro konkrétní aplikaci lze z nástroje „vyždímat“ maximum jeho možného potenciálu.

Volba vhodné geometrie nástroje a vhodného utvařeče třísky umožňuje snížit silové a tepelné zatížení nástroje a s tím spojená opotřebení. Má rovněž vliv na zbytková napětí, drsnost, přesnost a kvalitu obrobené plochy. Utvařeč třísky umožňuje snížení vývinu tepla díky zmenšení kontaktní plochy třísky a nástroje, další funkcí je utváření třísky tak, aby nezasahovala do nástroje nebo obrobené plochy a nemohla je poškodit.

Průběh a výstupy řezného procesu významně závisí na vlastnostech řezné části nástroje, která je zhotovena z příslušného nástrojového materiálu. K základním požadavkům na nástrojový materiál patří jeho tvrdost, odolnost proti opotřebení, tepelná vodivost, pevnost v ohybu, houževnatost apod. Všechny uvedené vlastnosti by měl nástrojový materiál splňovat při vyšších a vysokých teplotách po dostatečně dlouhou dobu. Mezi nástrojové materiály patří rychlořezné oceli, slinuté karbidy, cermety, řezná keramika, supertvrdé řezné materiály a brousící materiály.

Když je zvolen řezný materiál a vhodná geometrie nástroje, je třeba také najít odpovídající povlak. Povlak není jen pomyslnou „třešničkou na dortu“, ale

dnes už zcela neodmyslitelná součást nástroje. V závislosti na druhu použitého povlaku je možno zvýšit řeznou rychlost, obrábět bez použití řezných kapalin, docílit vyšší kvalitu obrobené plochy, snížit zatížení nástroje, a hlavně několikanásobně zvýšit životnost nástroje. Tímto způsobem je docíleno zvýšení produkce výroby.

5.1. Test odvalovacích fréz

K hodnocení toho, zdali se vyplatí investovat peníze do odpovlakování a povlakování nástrojů byl použit test prováděný pro společnost Škoda Auto a.s. Byly zde porovnány odvalovací frézy s povlakem společnosti Oerlikon Balzers a CemeCon. Na testování byl nasazen i nástroj bez povlaku. Na základě výsledku testů byly vypočítány roční náklady, do kterých byla zahrnuta cena nové odvalovací frézy, cena ostření (OS), odpovlakování (OD), povlakování (PO), doba výměny nástroje a hodinová sazba stroje v souvislosti s časovými ztrátami při výměně nástroje. Pro nástroj bez povlaku nebyly započítány náklady na odpovlakování a povlakování. Test byl proveden na odvalovací frézce při extrémních hodnotách řezné rychlosti 190 m/min.

Tab. 6 Test odvalovacích fréz

TEST ODVALOVACÍCH FRÉZ				
1. Nástroj	HSS odvalovací fréza Fette			
Rozměry	90x260 mm			
Dodavatel povlaku Povlak	Balzers ALCRONA	CemeCon HYPERLOX	Bez povlaku	Jednotky
Cena nového nástroje	1500			€
Cena OS/OD/PO	140	140	82	€
Počet možných naostření	20			
Počet obrobených dílů s novým nástrojem	2 500	3 000	400	kusů
Počet obrobených dílů s přeostrěným nástrojem	2 500	3 000	400	kusů
Počet obrobených dílů za celkovou životnost nástroje	52 500	63 000	8 400	kusů
Počet obrobků / rok	800 000			kusů
Počet použitých fréz / rok	16	13	96	kusů
Čas výměny nástroje	5			minut
Hodinová sazba stroje	500			€
Celková doba výměn / rok	1 600	1333	10 000	
Celkové náklady na výměnu / rok	13 333	11 111	83 333	€
Celkové náklady na nástroje / rok	66 666	55 055	300 190	€
Celková cena výměna + nástroje	80 000	66 166	383 523	

Z dosažených výsledků je zřejmé, že investice do povlakování a odpovlakování nástrojů se skutečně vyplatí (tab. 6). Bez nanesení povlaku se sice uspoří 58 € na absenci investice do odpovlakování a odpovlakování, avšak výsledné roční náklady při použití nástroje bez povlaku jsou ve srovnání s nástroji opatřenými povlakem až 5x vyšší. Srovnání obou napovlakovaných nástrojů je příznivější pro povlak společnosti CemeCon, roční úspora činí 13 834 €. Velkou položku tvoří ztráty způsobené prodlevami při výměně nástrojů. Nejen cena nástrojů a cena jejich nového naostření a napovlakování, ale také náklady způsobené časovými ztrátami musí být započítány do finálního hodnocení.

Odpovlakovat HSS již není v dnešní době závažný problém. Pokud by to ovšem podobně jako u slinutých karbidů problém byl, bylo by třeba přehodnotit veškeré výpočty a náklady s tím spojené. Výroba by se mohla značně prodražit, protože při nešetrném odstranění povlaku z HSS by nastaly finanční ztráty při transportu opotřebovaných nástrojů k výrobcí povlaků na odpovlakování, zpět na přeostření a poté opět zpět na napovlakování (to byl běžný postup, dokud nebyla vynalezena metoda šetrného odpovlakování HSS). Rovněž kvalita povlaku na nešetrně odpovlakovaném nástroji spojená s kvalitou obrobené plochy a životností povlaku by zajisté také byla horší.

V případě schopnosti kvalitního odpovlakování slinutých karbidů by bylo možno i přes vyšší cenu nástroje, nového ostření a vyšší ceny odpovlakování snížit celkové roční náklady na výrobu. Zejména schopností vyrobit více kusů obrobků na jedno naostření nástroje, a snížením ztrát při výměně nástrojů. Rovněž by nebylo třeba tolika fréz na naplnění potřeb výroby.

ZÁVĚR:

Cílem této práce bylo seznámení s různými mechanismy nanášení tenkých vrstev na řezné nástroje, výhodami a nevýhodami jednotlivých metod a jejich oblastí použití. Následoval popis přípravných operací pro stopkové nástroje a odvalovací frézy, které jsou nezbytně nutné pro zajištění nejvyšší kvality povlakování a nejlepší využití nástroje. Dále byly rozebrány jednotlivé metody používané pro odstraňování povlaků, vhodnost jejich použití v závislosti na druhu povlaku a substrátu, jejich klady a zápory. V předposlední části práce je krátký pohled do historie povlakování, zejména magnetronového rozprašování, jsou zde popsány různé druhy povlaků a jejich použití. Součástí této části je i popis povlakovacího zařízení fy. CemeCon s.r.o., jeho příprava před povlakováním a procesy které v něm probíhají při povlakování, je zde i popis přípravy nástrojů na povlakování a typy testování jejich kvality na výstupní kontrole po povlakování. V poslední části práce je na základě provedeného testu odvalovacích fréz snaha o vyzdvižení nezbytnosti technologie povlakování v dnešním průmyslu, a její příznivý vliv na snížení výrobních nákladů.

Součástí práce je rovněž vlastní experiment, ve kterém bylo snahou porovnat různé metody odstraňování povlaků ze slinutých karbidů a cermetů, jejichž odpovlakování je v současné době velmi problematické z důvodu napadení pojivové fáze. Ze všech metod byla největší pozornost věnována metodě chemického odpovlakování slinutých karbidů, která je patentována společností CemeCon. Pro posouzení vlivu jednotlivých odpovlakovacích metod byl použit i elektronový mikroskop k nafocení povrchu a provedení plošné analýzy prvků v substrátu.

Vzorky odpovlakované metodou patentovanou společností CemeCon nevykazují žádné poškození substrátu. Povrch vzorku dosahoval stejného lesku jako vzorek po vybroušení a vyleštění. Snímky pořízené elektronovým mikroskopem dokazují absenci poškození substrátu, pevná fáze zůstala pevně zakotvena v Co pojivu (Co – Ni pojivu v případě cermetu).

Vzorky odpovlakované metodou, která se používá pro odpovlakování HSS nástrojů dokazují nevhodnost nasazení této metody pro odpovlakování slinutých karbidů. Pojivová fáze byla z povrchu zcela odstraněna a povrch vzorku zdrsněl. Plošná analýza prokázala nepřítomnost pojivové fáze. Díky této destrukci by případný následný povlak i přes povrchové úpravy vykazoval horší adhezi k substrátu. Díky zdrsnění povrchu by obrobená plocha vykazovala horší kvalitu a nástroj by byl díky většímu tření na kontaktních plochách více tepelně zatížen.

Elektrochemické odpovlakování díky nemožnosti odstranění TiAlN povlaku v zařízení určeném pro odstranění AlCrN povlaku by nemohlo přinést žádné výsledky v hodnocení působení na substrát. Proto byl odpovlakování podroben vzorek, na který byl nanesen povlak jen z jedné poloviny. Pozorování pod elektronovým mikroskopem přineslo zjištění, že z povrchu byla naopak odstraněna pevná fáze, zatímco pojivová zůstala se zbytky obtisků po zrnech karbidů na svém místě. Plošná analýza rovněž potvrdila zvýšení obsahu kobaltu na povrchu vzorku.

Součástí experimentu bylo i srovnání adhezních vlastností povlaků nanesených na neodpovlakovaném vzorku a vzorku ze kterého byl odstraněn povlak metodou chemického odpovlakování slinutých karbidů. Z provedeného pokusu vyšlo najevo, že povlak na odpovlakovaném i neodpovlakovaném vzorku při vhodné přípravě povrchu vykazují výborné adhezní vlastnosti.

Dokonalé zvládnutí technologie odpovlakování je důležité pro následující dosažení dobrých vlastností povlaku a s tím souvisejícího dosažení vyšší kvality obrobenej plochy, vyšší stability procesu a menšího opotřebení nástroje. Vývoj a zdokonalení metody odpovlakování slinutých karbidů přináší velký pokrok ve strojírenském průmyslu, neboť je možno v některých aplikacích nasaďit nástroje ze SK tam, kde díky nemožnosti šetrného odstranění povlaku bylo třeba používat méně odolné nástroje z HSS u kterých je odstranění povlaku bezproblémové. Tato výměna nástrojů může přinést snížení nákladů na výrobu, což se projevuje na snížení výsledných cen výrobků.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: *Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook*. ISBN 91-97 22 99-4-6.
2. BAKU – CHEMIE. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.baku-chemie.de>>.
3. BRODEHL, Jörg. *Projektierung der Verfahrenstechnik zu nasschemischen Entschichtung von PVD (Physical vapour deposition) Titan-Hartstoffschichten auf Metalloberfalchen*. Diplomarbeit. Fachhochschule Aachen. Chemieingenieurwesen. Červen 1999.
4. Ceratizit EcoCut, vrtání a soustružení v jednom. CERATIZIT, květen 2003. 181/¹CZ05.03.
5. CONDE, A., CRISTOBAL, A. HOUSDEN, G. *Electrochemical stripping of hard ceramic chromium nitride coatings*. Science Direct. Thin Solid Films 484 (2005) 238–244.
6. CONDE, A., CRISTOBAL, A. FUENTES, G. *Surface analysis of electrochemically stripped CrN coatings*. Science Direct. Surface & Coatings Technology 201 (2006) 3588–3595.
7. *Cutting edge coatings*. Society of Manufacturing engineers. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.sme.org/cgi-bin/find-articles.pl?&00jl0098&ME&20000711&&SME&>>.
8. DESTEFANI, J. *Coatings. Manufacturing Engineering. October 2002 Vol. 129 No. 4*. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.sme.org/cgi-bin/find-issues.pl?&&ME&SME&>>.
9. HANS, Michael. *Method for removing the hard material coating applied on a hard metal workpiece and a holding device for at least one workpiece*. US patent 693906. Říjen 2000. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.patentstorm.us/patents/6627064-fulltext.html>>.
10. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Interaktivní multimediální text pro všechny studijní programy FSI. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Dostupné na World Wide Web: <<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=publikace>>.
11. HUMÁR, A. *Trendy v povlakování slinutých karbidů*. Průmyslové spektrum. Leden 2001, s. 43, Kód článku 010705. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu>>.
12. FIALA, Stanislav a HLADÍK, Petr. *Cermetové výstružníky*. Průmyslové spektrum. Duben 2004, č. 4, s.36-37. ISSN 1212-2572.
13. FEIG, Christoph. *Ausgangskontrolle. Arbeitsanweisung*. CemeCon. Březen 2006.

14. FEIG, Christoph. *Werkzeugpräparation: Nassstrahlen*. Arbeitsanweisung. CemeCon. Březen 2006.
15. KOČMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
16. KŘÍŽ, Antonín a PODANÝ, Pavel. *Vliv strippingu tenkých vrstev na vlastnosti substrátu*. Západočeská univerzita v Plzni. Katedra materiálu a strojírenské metalurgie. r. 2006. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.ateam.zcu.cz/prostudenty.html>>.
17. LIBRA, Martin. *Naprašování tenkých vrstev*. Elektro. Červenec 2003. Dostupné na World Wide Web: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25484>.
18. MATTOX, Donald. *The foundations of Vacuum Coating Technology*. Noyes Publications / William Andrew Publishing. r. 2003. ISBN:0-8155-1495-6.
19. MEISSNER, Michal. *Reaktivní magnetronové nanášení fotoaktivních vrstev TiO₂ a jejich vlastností*. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta aplikovaných věd. Katedra fyziky. r. 2007.
20. MONTEVERDE, F., MEDRI, V., BELLOSI, A., *Microstructure of hot-pressed Ti(C,N)-based cermets*. Journal of the European Society 22., Elsevier Science, Ltd 2002. pp.2587-2593.
21. *Oficiální web CemeCon*. Dostupné na World Wide Web: <http://www.cemecon.de/company/history/index_eng.html>.
22. *Oficiální web Ionbond*. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.ionbond.com>>.
23. PODANÝ, Pavel a KŘÍŽ, Antonín. *Předdepoziční procesy při výrobě tenkých vrstev*. Západočeská univerzita v plzni. Katedra materiálu a strojírenské metalurgie. r. 2006. Dostupné na World Wide Web: <www.ateam.zcu.cz>.
24. *Produkty a služby*. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.oerlikon.com/balzers/cz/>>.
25. *PVD coatings – Your guide to PVD coating technology, applications and theory*. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.pvd-coatings.co.uk/>>
26. SEN, Y. URGEN, M. CAKIR, A. *Stripping of CrN from CrN-coated high-speed steels*. Elsevier Science. Surface and Coatings Technology 113 (1999) 31–35.
27. ŠÍMA, Michal a JANKŮ, Roman. *Mechanická úprava monolitních nástrojů před PVD povlaky*. Průmyslové spektrum. Duben 2007. Kód článku 070438. Dostupné na World Wide Web: <<http://shm-cz.cz/cs/technicke-informace/literatura>>.
28. ŠÍMA, Michal. ZINDULKA, Ondřej. *Měření vlastností povlaků na nástrojích*. SHM. Duben 2006. Dostupné na World Wide Web: <<http://shm-cz.cz/cs/technicke-informace/literatura>>.

29. ŠÍMA, Michal. ZINDULKA, Ondřej. HOLUBÁŘ, Pavel. *Technologie úprav nástrojů před a po povlakování*. SHM. r. 2005. Dostupné na World Wide Web: <<http://shm-cz.cz/cs/technicke-informace/literatura>>.
30. VALTER, Jan a VYSKOČIL, Jiří. *Plazmové povlakování*. Strojárstvo. Září 2004, s. 82, Dostupné na World Wide Web: <<http://www.strojarstvo.sk/inc/index.php?ln=SK&tl=3&tpl=archiv.php&ids=2&cislo=9/2000&idclan=70>>.
31. *Wässrige Reinigung vor der PVD-Beschichtung Entschichtung von Hartmetallen & HSS-Teilen*. Borer Chemie AG . Dostupné na World Wide Web: <www.borer.ch>.
32. ZINDULKA, Ondřej. *Moderní metody povlakování nástrojů*. SHM. Říjen 2004. Dostupné na World Wide Web: <<http://shm-cz.cz/cs/technicke-informace/literatura>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
----------------	----------	-------

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Povrch nenapovlakovaných vzorků.
Příloha 2 Povrch vzorků odpovlakovaných metodou chemického odpovlakování slinutých karbidů.
Příloha 3 Povrch vzorků odpovlakovaných metodou chemického odpovlakování HSS.
Příloha 4 Povrch SK odpovlakovaného metodou elektrochemického odpovlakování.
Příloha 5 Zbytky povlaků po strippingu.
Příloha 6 Řezy vzorky na rozhraní povlak – substrát.